

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Pawła Zygmunta Kowaleczki

która odbędzie się w dniu **23 kwietnia 2025 roku**, o godzinie **12:00** w trybie łączonym (stacjonarnie i zdalnie)

Temat rozprawy:

„Super-resolution algorithms and evaluation procedures for satellite imagery data”

Promotor: prof. dr hab. inż. Przemysław Rokita -Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Bogusław Cyganek – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. uczelni – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

prof. dr hab. inż. Adam Wojciechowski – Politechnika Łódzka

Obrona odbędzie się na **Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych** oraz zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie w formie zdalnej proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr. hab. inż. Piotr Gawrysiak, email: piotr.gawrysiak@pw.edu.pl, do dnia 22 kwietnia 2025 r., do godz. 16:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techiczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Pawel-Zygmunt-Kowaleczko>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas

Algorytmy i procedury ewaluacji metod rekonstrukcji nadrozdzielczej dla obrazów satelitarnych

Streszczenie.

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z rekonstrukcją nadrozdzielczą (ang. *super-resolution*) obrazów satelitarnych. Sformułowane zostały trzy główne cele badawcze:

- Opracowanie i kompilacja rzeczywistego zestawu danych obrazów satelitarnych składającego się z obrazów w niskiej i wysokiej rozdzielczości pozyskanych przez różne satelity.
- Propozycja schematu ilościowej oceny dla tego zestawu danych dostosowanego do wyzwań wynikających z różnych źródeł obrazów w niskiej i wysokiej rozdzielczości.
- Opracowanie procesu generowania obrazów hiperspektralnych o zwiększonej rozdzielczości przestrzennej wykorzystywanych następnie w zaawansowanych zadaniach monitorowania środowiska.

Pierwsze dwa cele zrealizowano poprzez opracowanie autorskiego zbioru danych satelitarnych MuS2, który dla każdej sceny zawiera 14 lub 15 obrazów multispektralnych o niskiej rozdzielczości, zarejestrowanych przez satelitę Sentinel-2, oraz jeden obraz multispektralny o wysokiej rozdzielczości, pochodzący z satelity WorldView-2. W pracy szczegółowo opisano proces tworzenia tego zbioru, jego właściwości oraz zaproponowano i przetestowano metodę ewaluacji algorytmów rekonstrukcji nadrozdzielczej. Metoda ta uwzględnia trudności wynikające z różnic w źródłach danych o niskiej i wysokiej rozdzielczości poprzez wprowadzenie odpowiedniego maskowania.

Trzeci cel osiągnięto poprzez zastosowanie metod jednoobrazowej rekonstrukcji nadrozdzielczej oraz metod fuzji obrazów multispektralnych z obrazami hiperspektralnymi dla danych pochodzących z satelitów PRISMA i TROPOMI. Zrekonstruowane obrazy zostały wykorzystane przez współpracowników autora w trzech praktycznych zastosowaniach: estymacji zanieczyszczeń powietrza, analizy zanieczyszczeń wody oraz oceny zawartości azotu w glebie. Wyniki tych analiz, zamieszczone w pracy, uzupełniają badania autora i potwierdzają przydatność zrekonstruowanych obrazów satelitarnych w rzeczywistych przypadkach użycia.

Słowa kluczowe: rekonstrukcja nadrozdzielcza, wizja komputerowa, obrazy satelitarne, teledetekcja, głębokie sieci neuronowe

Prof. dr hab. inż. Bogusław Cyganek

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Instytut Elektroniki

cyganek@agh.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko**

zatytułowanej:

***Super-resolution algorithms and evaluation procedures
for satellite imagery data***

Wstęp

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko pt. „*Super-resolution algorithms and evaluation procedures for satellite imagery data*”¹, która powstała w roku 2024 w Politechnice Warszawskiej. Promotorem pracy jest Pan prof. dr hab. inż. Przemysław Rokita. Przygotowanie recenzji zostało wykonane na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, Pana prof. dra hab. inż. Jarosława Arabasa. Praca została napisana w języku angielskim. Recenzja sporządzona została w postaci odpowiedzi na pytania dotyczące rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko.

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Jaki jest najważniejszy problem rozważany w rozprawie?

Dzięki łatwo dostępnym i ciągle unowocześnianym aparatom cyfrowym, choćby wbudowanym w nasze telefony komórkowe, wykonujemy mnóstwo zdjęć i filmów. Z pewnością wspólnie doświadczamy sytuacji, w których niektóre zdjęcia po prostu nie wychodzą – może to być spowodowane np. przez nieodpowiednią ekspozycję, zmienne światło, przysłonięcia obiektów, za małą rozdzielczość lub poruszenie zdjęcia ze względu na zbyt szybko przemieszczające się obiekty itd. Taką sytuację możemy łatwo rozwiązać po prostu robiąc kolejne zdjęcie, pod warunkiem że obiekt się nie oddalił, lub używając lepszego aparatu, bądź droższego telefonu. Istnieją jednak pewne fizyczne ograniczenia, takie jak długość ogniskowej, wielkość sensora, jasność obiektywu, zniekształcenia optyczne, które sprawiają że w żadnym przypadku, nawet przy zastosowaniu bardziej zaawansowanego sprzętu, nie osiągniemy dowolnie dużej rozdzielczości. Sytuacja jest jeszcze bardziej skomplikowana w przypadku zdjęć lotniczych lub satelitarnych, które mimo użycia drogich i profesjonalnych czujników wielospektralnych również wykazują liczne ograniczenia, szczególnie dotyczące rozdzielczości przestrzennej, ale również spektralnej. Dobra jakość tego typu zdjęć i sekwencji zdjęć jest kluczowa, gdyż od niej zależy do czego będą one przydatne. A przykłady zastosowań są tu liczne – są to m.in. określanie położenia obiektów

¹ Algorytmy i procedury ewaluacji metod rekonstrukcji nadrozdzielczej dla obrazów satelitarnych

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu: 14.05.2023

naziemnych i nawigacja, określenie klas widocznych obiektów, analiza i śledzenia zmian ich położenia, jak również do ocena stanu pogody, wód powierzchniowych, stopnia zalesienia, czy też ocena stanu upraw w rolnictwie itd. Ze względu na koszty, jak również na istotę wymienionych pomiarów, jakość oryginalnych zdjęć, jak również możliwości ich późniejszej poprawy są pierwszoplanowe. Mimo iż istnieją techniki sprzętowe pozwalające na obejście niektórych ograniczeń fizycznych, są one często zbyt kosztowne lub po prostu niedostępne. Okazuje się jednak, że dzięki zastosowaniu odpowiednich algorytmów możliwe jest poprawienie jakości obrazów, a szczególnie zwiększenie ich rozdzielczości już po wykonaniu zdjęć. Wykorzystując wcześniej zgromadzone informacje i pewną redundancję w obrazach, algorytm jest w stanie poprawić zdjęcie, czy też szereg zdjęć, umożliwiając m.in. dostrzeżenie wcześniej niewidocznych szczegółów obserwowanych scen. Metody te oparte są na algorytmach super-rozdzielczości (ang. *super-resolution*; SR), zwanej również nad-rozdzielczością, które na podstawie zdjęcia niskiej rozdzielczości (ang. *low resolution*; LR) lub ich sekwencji, obliczają wersję o wyższej rozdzielczości. Problem ten jest jednak bardzo skomplikowany i mimo licznych badań nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie. Za to istnieje wiele wersji algorytmów, które wciąż są rozwijane i udoskonalane. Najnowsze z nich bazują na przełomowych rozwiązaniach sztucznej inteligencji AI, takich jak głębokie splotowe sieci neuronowe (ang. *deep convolutional neural networks*), jak również transformery wizyjne (ang. *Visual Transformer* – ViT). Bazujące na nich metody SR mają szerokie zastosowanie między innymi we wspomnianym obrazowaniu lotniczym i satelitarnym. Jednakże charakterystyczną cechą wspomnianych najnowszych metod bazujących na AI jest konieczność zapewnienia im odpowiednio dużych i właściwie przygotowanych zbiorów danych uczących. Problem ten jest szczególnie trudny w przypadku wspomnianych i bardzo wymagających sekwencji lotniczych i satelitarnych. Okazuje się bowiem, że dostępne zbiory danych, czy też dane uzyskane w sposób sztuczny są niewystarczające do profesjonalnej oceny jakościowej algorytmów SR. Istniejące dane prowadzą przeważnie do nieprawidłowej oceny tego typu algorytmów, która przeważnie wskazuje na zbyt optymistyczne wyniki w porównaniu z warunkami rzeczywistymi. Co więcej, sam proces oceny jakości tych algorytmów wymaga głębszej analizy i udoskonalenia, tak aby uwzględniał on wymagania dotyczące warunków rzeczywistych.

Praca naukowa oraz metody zaprezentowane w rozprawie doktorskiej Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko wpisują się w ten obszar badań. Celem naukowym Pana Pawła Kowaleczko było przede wszystkim:

- (i) Opracowanie nowych zbiorów danych rzeczywistych zdjęć satelitarnych składającego się z obrazów o niskiej i wysokiej rozdzielczości zarejestrowanych przez różne satelity;
- (ii) Zaproponowanie nowych metod oceny ilościowej dla nowych zbiorów danych uwzględniających wyzwania wynikające z odmiennych źródeł danych o niskiej i wysokiej rozdzielczości;
- (iii) Opracowanie procesu generowania obrazów hiperspektralnych o większej rozdzielczości przestrzennej, zastosowanych następnie do zaawansowanych zadań monitoringu środowiska naturalnego.

Zagadnienia naukowe podjęte przez Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko mają duże znaczenie zarówno w zakresie badań teoretycznych, jak i eksperymentalnych, a ich wyniki mogą mieć szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny.

Czy praca ma on charakter naukowy?

Wyżej zarysowane problemy mają charakter naukowy. Mimo wielu prób i światowych badań ciągle nie istnieją algorytmy i metody, które w pełni spełniałyby wymagane założenia. Dlatego istnieje potrzeba kontynuacji badań w tym zakresie, a dostarczenie nowych rozwiązań w dobie dominacji metod AI

wymaga przede wszystkim opracowania oryginalnych zbiorów danych. Niemniej istotne jest opracowanie skutecznych metod ich analizy i oceny, które uwzględniają skomplikowane zależności występujące w warunkach rzeczywistych. Zarówno zagadnienia naukowe, jak i wyzwania eksperymentalne, a co ważniejsze, sposoby ich rozwiązania zostały zaprezentowane w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko.

Czy ma on znaczenie praktyczne?

Podjęty przez Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko problem badawczy niewątpliwie posiada istotny walor i znaczenie praktyczne – zaprezentowane rozwiązania mogą wprost prowadzić do ich aplikacji w systemach przetwarzania i analizy sekwencji zdjęć lotniczych i satelitarnych.

2. Wkład Autora

Jaki jest najważniejszy wkład autora opisywane w rozprawie?

Główne osiągnięcia Doktoranta Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko dotyczą następujących zagadnień naukowych.

1. *Opracowanie nowych zbiorów danych rzeczywistych zdjęć satelitarnych składającego się z obrazów o niskiej i wysokiej rozdzielczości zarejestrowanych przez różne satelity.*

Niedostateczna rozdzielczość przestrzenna sekwencji obrazów lotniczych oraz satelitarnych stanowi znaczące ograniczenie technologiczne, które jest szczególnie dotkliwe w przypadkach gdy uzyskanie nowych pomiarów nie jest możliwe ze względu na ograniczenia fizyczne, czy też zbyt wysokie koszty. Problem ten można zaobserwować np. w przypadku danych pochodzących z satelity Sentinel-2, które co prawda są ogólnie dostępne i bez dodatkowych opłat, ale których rozdzielczość przestrzenna ograniczona jest do ok. 10 m odległości w terenie. Wykorzystując nowe metody SR możliwe jest jednak zwiększenie tej rozdzielczości, a szczególnie gdy dostępne jest wiele obrazów tego samego obszaru, które zostały zarejestrowane w kolejnych przelotach satelity. Sytuacja taka stwarza możliwość fuzji, czyli odpowiedniego połączenia, wspomnianych zdjęć właśnie w celu uzyskania lepszych parametrów. Jest to jednak pewna aproksymacja danych rzeczywistych i w celu przeprowadzenia wiarygodnych pomiarów i analiz treści obrazowych konieczne są metody oceny jakości tak otrzymanych obrazów. Z braku dostatecznie obszernych zbiorów danych do tego celu używa się przeważnie danych uzyskanych w sposób sztuczny. Tym niemniej, jest to kolejne przybliżenie, które – jak się okazuje – wykazuje nieco zbyt optymistyczne wartości gdy są one odniesione do warunków rzeczywistych. Problem ten został dostrzeżony przez Doktoranta Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko oraz zespół naukowy do którego należy. W tym celu Doktorant wraz z zespołem stworzyli nowy zbiór danych MuS2, który może być właśnie użyty do rzeczywistej oceny nowoczesnych metod zwiększających rozdzielczość obrazów satelitarnych.

Powstanie tego zbioru danych jest odpowiedzią na niedobór zbiorów danych pochodzących ze zdjęć satelitarnych otrzymanych w warunkach rzeczywistych, a na których są testowane kolejne metody wielo-obrazowych SR (ang. MISR). Charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest zastosowanie dwóch typów obrazów, zarówno o niskiej (LR), jak i wysokiej rozdzielczości (HR) zarejestrowanych przez różne satelity. W tym przypadku są to: Sentinel-2 i WorldView-

2, przy czym obrazy WorldView-2 służą jako odniesienie w wysokiej rozdzielczości. MuS2 jest bardzo obszerny – zawiera aż 91 różnych scen, które pokrywają przeszło 3200 km² terenów. Każda z zawartych tam scen złożona jest z co najmniej 14 obrazów MSI pochodzących z Sentinel-2, odpowiadających jednej sekwencji MSI z WorldView-2.

Ale zbiór tego typu to nie tylko samo zarejestrowanie i przechowanie danych. W celu przeprowadzenia wiarygodnych eksperymentów wymaga on żmudnego i profesjonalnego przygotowania. Pierwszy problem do rozwiązania to rozbieżność między super-rozdzielczością w obrazach LR i ich odpowiedników HR, które są wynikiem różnych charakterystyk fizycznych czujników optycznych, jak również różnic czasowych i pozostałych warunków, choćby meteorologicznych ich akwizycji. Tak jak już wspomniano, przygotowanie tak obszernego i skomplikowanego zbioru jak MuS2 wymagało zaangażowania całego zespołu naukowego, do którego należy p. mgr inż. Paweł Kowaleczko. Tym niemniej, oryginalny wkład Doktoranta jest tutaj bardzo istotny i polega m.in. na opracowaniu i implementacji odpowiedniego środowiska programowego, a następnie z jego wykorzystaniem na zbieraniu oraz przetworzeniu danych. Nie mniej istotne było tu przygotowanie odpowiednich masek uwzględniających wariację sygnału w poszczególnych scenach. Bardzo cenną informacją dla środowiska naukowego jest fakt, że zbiór MuS2 został publicznie udostępniony.

2. *Opracowanie nowych metod oceny ilościowej dla nowych zbiorów danych uwzględniających wyzwania wynikające z odmiennych źródeł danych o niskiej i wysokiej rozdzielczości.*

Od samego przygotowania danych, takich jak MuS2, niemniej istotne jest zaproponowanie naukowych metod ich oceny. Większość znanych protokołów polega na zgromadzeniu zbioru obrazów, które potraktujemy jako HR. Następnie podlegają one procesom zmniejszenia rozdzielczości oraz dodatkowych zmian – głównie zaburzeń takich jak dodatkowy szum czy zniekształcenia – w wyniku czego otrzymywany jest odpowiadający im zbiór SR. Zbiór ten następnie jest „poprawiany” z wykorzystaniem znanych algorytmów – tu często stosuje się metody oparte na głębokich sieciach neuronowych oraz nowszych transformerach wizyjnych, takich jak zastosowane przez Autora RAMS (ang. *Residual Attention MISR Network*) oraz HighRes-Net – a wynik jest porównywany z oryginalną partycją HR. Jednakże w przypadku zbiorów takich jak MuS2 konieczne jest rozszerzenie tego procesu choćby ze względu na konieczność uwzględnienia zmiennych charakterystyk sensorów optycznych oraz warunków samej akwizycji tych sekwencji – pamiętajmy że MuS2 zawiera odpowiadające sobie obrazy uzyskane z różnych satelitów. Aby sprostać tym wyzwaniom p. mgr inż. Paweł Kowaleczko opracował dedykowaną procedurę (protokół) oceny, wykorzystującą m.in. dopasowanie histogramów, jak również zastosowanie specjalnie przygotowanych masek zmian do określenia miejsc obrazowych o znacznej wariacji sygnału, która odpowiada rzeczywistym zmianom w terenie. Wspomniane maski zmian, połączone z maskami istotności, wskazują takie obszary obrazu które można skonsolidować do oceny w oparciu o miary podobieństwa obrazu na poszczególnych pikselach.

Dodatkowo gruntownie przeanalizowane oraz zrewidowane zostały miary oceny jakości rekonstrukcji obrazów, takie jak dobrze znane PSNR (ang. *Peak Signal-to-Noise Ratio*) oraz SSIM (ang. *Structural Similarity Index Measure*), jak również stosunkowo nowa LPIPS (ang. *Learned Perceptual Image Patch Similarity*), która bazuje na ocenie z wykorzystaniem semantycznych cech pochodzących z głębokich warstw sieci neuronowych. Dzięki dogłębnemu zbadaniu właściwości każdej z tych oraz innych, nie wymienionych tutaj z nazwy miar, oraz wyodrębnieniu ich indywidualnych zalet oraz wad, p. mgr inż. Paweł Kowaleczko

zaproponował nową miarę będącą ich hybrydowym połączeniem, w którym wpływ każdej kontrolowany jest odpowiadającym normalizacyjnym.

Praca ta została wykonana przez p. mgr inż. Paweł Kowaleczko przy współpracy z zespołem naukowym, do którego należy. Zarówno metodyka przygotowania zbioru MuS2, jak również opracowane schematy ewaluacyjne oraz ich wyniki zostały opublikowane m.in. w ważnej publikacji, w której p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest pierwszym z autorów:

P. Kowaleczko, T. Tarasiewicz, M. Ziaja, D. Kostrzewa, J. Nalepa, P. Rokita, and M. Kawulok, "A real-world benchmark for Sentinel-2 multi- image super-resolution," Scientific Data , Vol. 10, no. 1, 2023 (IF=5,8)

3. *Opracowaniu metody generowania obrazów hiperspektralnych o większej rozdzielczości przestrzennej, zastosowanej następnie do zaawansowanego monitoringu środowiska naturalnego.*

Kolejnym osiągnięciem p. mgr inż. Pawła Kowaleczko jest opracowanie procesu SR dla zdjęć satelitarnych PRISMA i TROPOMI i w kontekście praktycznych zastosowań. Zaadaptowane zostały dwie metody SISR – Bi-3DQCNN i HAT w celu ulepszenia obrazów wielospektralnych PRISMA. Z kolei zastosowana metoda fuzji z wykorzystaniem sieci Fusion-Net była zastosowany do integracji danych hiperspektralnych PRISMA i TROPOMI. Dzięki temu otrzymane zostały dane wyjściowe SR o wysokiej rozdzielczości, zarówno przestrzennej jak i spektralnej. Było to istotne wyzwania wynikające z różnic między wielospektralnymi i hiperspektralnymi źródłami danych. Zaproponowane metody SR zostały zweryfikowane za pomocą standardowych metod walidacyjnych potwierdzając ich skuteczność.

Otrzymane w ten sposób sekwencje SR zostały następnie wykorzystane przez p. mgr inż. Pawła Kowaleczko wraz z zespołem naukowym, do zadania monitoringu środowiska naturalnego, w tym m.in. do oceny jakości wody, szacowania zawartości azotu w glebie oraz analizy zanieczyszczenia powietrza. Co ciekawe, zostało wykazane że w wielu przypadkach wyniki walidacyjne były między sobą rozbieżne. Świadczy to o konieczności stosowania różnych podejść do problemu SR i jego walidacji – w tym kontekście dość niezależne okazały się wyniki walidacji z wykorzystaniem metody HyperTransformer gdyż ocena w tym przypadku odbywała się z wykorzystaniem gęstszych i dokładniejszych siatek pokrycia obserwowanej sceny.

Wyniki tych prac zostały opublikowane w niedawnej pracy, w której p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest drugim z autorów:

M. Kawulok, **P. Kowaleczko**, M. Ziaja, J. Nalepa, D. Kostrzewa, D. Latini, D. De Santis, G. Salvucci, I. Petracca, V. La Pegna, Z. Bartalis, and F. Del Frate, "Hyperspectral image super-resolution: Task-based evaluation," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 17, 2024 (IF=4,7).

Wszystkie wyżej opisane zagadnienia badawcze, jak i ich oryginalne rozwiązania naukowe zaproponowane przez Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko świadczą o Jego dużej wiedzy i dojrzałości naukowej, jak również znajomości najnowszych osiągnięć i technologii światowych.

3. Poprawność naukowa

Czy stwierdzenia zawarte w rozprawie są godne zaufania? Czy uzasadnienia są poprawne? Wskaż zauważone słabości i błędy. Wskaż także te aspekty dotyczące poprawności, które są najbardziej wartościowe.

Pan mgr inż. Paweł Kowaleczko podjął uzasadnioną naukowo metodykę prowadzenia badań polegającą na formułowaniu problemów, obserwowaniu i analizie istniejących rozwiązań, a następnie na proponowaniu nowych, lepszych rozwiązań oraz stawianiu tez naukowych, które w końcu podlegały weryfikacji eksperymentalnej. Poprzez wnikliwą obserwację wyników, p. mgr inż. Paweł Kowaleczko mógł zweryfikować swoje założenia, jak również zaproponować nowe rozwiązania – dzięki temu, wszystkie zaproponowane rozwiązania, jak i tezy postawione w rozprawie, zostały zweryfikowane eksperymentalnie.

Poprawność zaproponowanych rozwiązań jest też potwierdzona poprzez publikacje naukowe z udziałem Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko, w *recenzowanych* periodykach o zasięgu światowym. Na szczególne podkreślenie zasługują tutaj dwie publikacje, w których Doktorant jest jednym z autorów:

1. **P. Kowaleczko**, T. Tarasiewicz, M. Ziaja, D. Kostrzewa, J. Nalepa, P. Rokita, and M. Kawulok, "A real-world benchmark for Sentinel-2 multi- image super-resolution," *Scientific Data* , Vol. 10, no. 1, 2023 (IF=5,8).
2. M. Kawulok, **P. Kowaleczko**, M. Ziaja, J. Nalepa, D. Kostrzewa, D. Latini, D. De Santis, G. Salvucci, I. Petracca, V. La Pegna, Z. Bartalis, and F. Del Frate, "*Hyperspectral image super-resolution: Task-based evaluation*," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 17, 2024 (IF=4,7).

Dodatkowo p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest współautorem w :

3. Rozdziału w książce, w którym Doktorant jest pierwszym z autorów:
P. Kowaleczko, M. Ziaja, D. Kostrzewa, and M. Kawulok, "*Introduction to super-resolution for remotely sensed hyperspectral images*", in *Super-Resolution for Remote Sensing* , M. Kawulok, J. Kawulok, B. Smolka, and M. E. Celebi, Eds. Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1–26, ISBN: 978-3-031-68106-6.
4. Siedmiu publikacjach głównie konferencyjnych dotyczących procesów związanych z przetwarzaniem obrazów wielospektralnych i metodami poprawy ich parametrów;
5. Pięciu publikacji naukowych dotyczących innych tematów badawczych.

Wyżej opisane osiągnięcia naukowe, zarówno w postaci nowych zbiorów danych LR-SR, jak również oryginalnych metod ich oceny i procedury ewaluacji są niewątpliwie nowatorskie i dostarczają nową istotną wiedzę w skali światowej. Tym niemniej, są one wynikiem intensywnej pracy całego zespołu badawczego, do którego należy Doktorant. Najważniejsze osiągnięcia zostały zaprezentowane w dwóch wcześniej wymienionych istotnych publikacjach – w pierwszym przypadku jest to wynik współpracy 7 autorów, a w drugim aż 12! Z kolei sam tekst doktoratu to kompilacja tych oraz innych prac naukowych, w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym ze współ-autorów. W takim kontekście bardzo trudno jest precyzyjnie wyłonić i ocenić indywidualny wkład naukowy Doktoranta. Sytuację nieco poprawiają dopiski w bibliografii dotyczące wkładu autorskiego, zarówno w samej rozprawie, jak i w artykułach. Jednakże Doktorant powinien *explicite* zaprezentować swój indywidualny i oryginalny wkład w każdą z zaprezentowanych metod.

Baza publikacji Web of Science zawiera 5 publikacji, w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym z autorów. Jego współczynnik H=1 (stan: luty 2025).

Poniżej zostały zestawione pozostałe kwestie, pytania, ale i sugestie naukowe wymagające lepszego uzasadnienia lub dodatkowej dyskusji i wyjaśnienia.

1. Rozdział 3 – po szczegółowym opisie metod zwiększania rozdzielczości warto by się zastanowić nad zagadnieniem związanym z możliwością poprawy kolejnego parametru obrazów, którym jest zakres dynamiczny wartości poszczególnych sygnałów (pikseli). Problem ten w literaturze światowej znany jest pod nazwą obrazowania HDR (ang. *High Dynamic Range*). Czy opracowane przez Autora metody i procedury można by zastosować w tym przypadku? Czy możliwe byłoby skonstruowanie całościowych systemów (sieci) typu *end-to-end* do trenowania zarówno pod kątem SR, jak i HDR?
2. Opracowane zbiory danych takie jak MuS2 oraz procedury ich oceny jako pierwszoplanowe stawiają sobie zadanie oceny „jakości” otrzymanych obrazów SR. Tym niemniej, poprawa rozdzielczości, szczególnie otrzymana w ten sposób, niekoniecznie i nie zawsze musi się przekładać na lepsze wyniki np. detekcji obiektów w obrazach satelitarnych/lotniczych. Czy możliwa jest konstrukcja takich obrazów, które jako miarę przyjmowałyby te inne zadania, takie jak wspomniana detekcja? Co więcej, czy możliwa jest integracja metod SR z metodami (sieciami) detekcji obiektów?
3. Podane miary, takie jak m.in. wyrażone wzorami (46), (47) itd. mogą prowadzić do niestabilności obliczeniowych w przypadku bardzo małych wartości w ich mianownikach – czy istnieją metody detekcji, czy też radzenia sobie z tego typu praktycznymi sytuacjami? Jak jest to zaimplementowane w metodach używanych przez Doktoranta?
4. W rozdziale 5.2 opisane są metody konstrukcji masek obrazowych, które polegają głównie na analizie wariancji sygnału i pewnych wartości progowych (ang. *threshold*). Ale czy w dobie głębokich sieci neuronowych jest to jedyne i właściwe podejście? Można by przedyskutować czy nie mogłyby być tutaj użyte np. głębokie cechy semantycznie, o których Autor wspominał w innych partiach swojej dysertacji?
5. Str. 75 – niejasne pojęcie „hallucinations”, ale co to znaczy? To pojęcie jest raczej przypisywane wielkim modelom językowym (LLM, ChatGPT), raczej niż sieciom typu VGG, o których jest mowa w tym rozdziale. Zagadnienie to wymaga bliższego wyjaśnienia.
6. Rozdział 6.5.2 – warto by rozszerzyć opis procesu nad-próbkowania (ang. *upsampling*) w przypadku PRISMA HSI za pomocą dekompozycji do komponentów głównych PCA oraz podmiany komponentu dominującego. Ciekawe byłoby dokonanie analizy tego procesu w nieco bardziej precyzyjny sposób, np. z wykorzystaniem opisu matematycznego i pokazania kolejnych kroków obliczeniowych.

Powyższa lista pytań dotyczy dodatkowych zagadnień naukowych lub też prośby o głębsze potraktowanie pewnych tematów poruszonych w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko. Tym niemniej, mają one wyłącznie charakter dyskusyjny i nie umniejszają istotnego wkładu merytorycznego przedstawionego w tej rozprawie.

4. Wiedza Kandydata

Które z rozdziałów (lub sekcji w rozdziałach) rozprawy omawiają istniejący stan wiedzy i dzięki temu potwierdzają ogólny stan wiedzy kandydata w zakresie ITT? Jakie obszary tych dyscyplin zostały omówione w tych rozdziałach/sekcjach? Jaka jest opinia recenzenta o jakości tych rozdziałów/sekcji? Jaka jest opinia recenzenta o bibliografii? Na ile bibliografia jest kompletna? Prosimy o podanie innych

argumentów za lub przeciw stwierdzeniu, że kandydat posiada ogólną wiedzę w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Analizę wiedzy Doktoranta należy zacząć od analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej. Praca ta jest obszerna i liczy 144 strony. Została napisana po angielsku i składa się z 8 rozdziałów oraz bibliografii. Niestety jest to rodzaj kompilacji opisów różnych zagadnień naukowych i o różnym stopniu złożoności, poczynając od opisu elementarnych algorytmów interpolacji takich jak dwu-liniowa, czy też dwukwadratowa (rozdział 2), poprzez bardziej zaawansowane metody otrzymywania obrazów nad-rozdzielczości (rozdział 3), opis dostępnych zbiorów danych satelitarnych (rozdział 4), a następnie procedur ewaluacji metod nad-rozdzielczości (rozdział 5), aż do opisu praktycznych przypadków użycia satelitarnych obrazów nad-rozdzielczych (rozdział 6). Opis ten należy postrzegać w kontekście rozdziału w książce na temat SR, jak również innych publikacji naukowych, w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym ze współautorów.

W tym kontekście zupełnie jednak nie rozumiem przyjętej przez p. mgr inż. Pawła Kowaleczko koncepcji prezentacji swoich wyników w postaci tak skomponowanej rozprawy doktorskiej! Moim zdaniem jest to raczej nieporozumienie, gdyż posiadając liczne publikacje wystarczyło je zacytować, bądź też po prostu dołączyć ich kopie, oczywiście przy zachowaniu odpowiednich praw autorskich, a w rezultacie istotnie podnieść jakość całej rozprawy przy jednoczesnym jej znacznym skróceniu. W obecnej formie Autor praktycznie kopiuje większość zamieszczonych ilustracji i diagramów z przytoczonych swoich prac, opłatając je mniej lub bardziej oryginalnym tekstem, również w języku angielskim. Przykładowo rysunek 6.5 zaczerpnięty z przytoczeniem odpowiednich praw własności z pracy [7] – w ogóle nie rozumiem po co taki rysunek serwować czytelnikowi? Po pierwsze jest to kopia 1-do-1 rysunku z wymienionej publikacji, ale – po drugie – w tej wersji jest on nieco mylący, gdyż liczności warstw neuronowych sugerują inną ich dystrybucję niż ta opisana w tekście. W rozprawie można więc było te wartości podać prawidłowo, choćby je dopisać na tym rysunku, niż po prostu skopiować. Pisanie tego typu pracy być może miałoby jakiś sens gdyby przedstawione w niej zostały jakieś istotne nowe odkrycia naukowe i takie, które wcześniej nie były opublikowane, bądź też aktualnie nie są dostępne gdyż znajdują się w procesie recenzji. Niestety, analizując zarówno treść tej obszernej pracy oraz publikacji w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym ze współautorów nie zauważam żadnych takich treści.

Praca kończy się podsumowaniem osiągnięć Doktoranta (rozdział 7), podziękowaniami (rozdział 8) oraz innymi dodatkami w tym bibliografią. Ta ostatnia liczy 157 pozycji, co stanowi o dobrej orientacji Doktoranta w tej nowoczesnej dziedzinie nauki.

Tym niemniej powyższe krytyczne uwagi dotyczą raczej przyjętego stylu prezentacji swoich osiągnięć w rozprawie doktorskiej, a nie samych opracowanych metod i wyników. W tym aspekcie, i tak jak już wspominałem w poprzednich rozdziałach recenzji, pozytywnie oceniam zarówno wiedzę i dojrzałość naukową p. mgr inż. Pawła Kowaleczko, jak również jego umiejętności zbierania oraz przetwarzania danych, organizacji eksperymentów naukowych, jak również programowania systemów przetwarzania i klasyfikacji danych.

Podsumowując, opracowanie nowych metod do tak ambitnego zadania wymagało od Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko zarówno dogłębnej znajomości już istniejących metod światowych, wiedzy zarówno w aspekcie teoretycznym, jak również w kontekście przetwarzania dużych zbiorów danych oraz organizacji eksperymentów. Nie mniej istotne były umiejętności *stricte* informatyczne Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko, który tworzył oprogramowanie do przetwarzania dużych wolumenów danych i systemów uczących się.

5. Podsumowanie

Postawione przez Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko tezy naukowe zostały w pełni wykazane. Opracowane przez niego metody są oryginalne i na wysokim poziomie. Stanowią one oryginalny własny wkład Doktoranta Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko w rozwój dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja. Przy ich realizacji Pan magister inżynier Paweł Kowaleczko wykazał się dogłębną znajomością najnowszych metod i algorytmów przetwarzania obrazów wielospektralnych, jak również dobrym opanowaniem warsztatu badawczego, a w rezultacie również wysoką dojrzałością naukową.

Recenzowaną pracę oceniam jako z spełniającą formalne oraz zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o jej przyjęcie oraz o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko do publicznej obrony.

B. GYS

dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. ZUT

Wydział Informatyki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

ul. Żołnierska 52, 71-210, Szczecin

e-mail: radoslaw.mantiuk@zut.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej wykonana dla Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

Tytuł recenzowanej rozprawy:

Super-resolution algorithms and evaluation procedures for satellite imagery data

Autor rozprawy:

Mgr inż. Paweł Kowaleczko

Recenzja wykonana została na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z dnia 10.12.2024 r.

- 1 **Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Rozprawa doktorska omawia zagadnienia związane z technikami zwiększania rozdzielczości (ang. super-resolution techniques) multispektralnych obrazów satelitarnych. Wspomniany proces ma na celu polepszenie wyników analizy poprzez zwiększenie rozdzielczości przestrzennej obrazów. Przeprowadza się go w przypadkach, w których nie ma dostępu do wysoko-rozdzielczych obrazów danego terenu, co jest typowe dla obrazów multispektralnych rejestrowanych za pomocą dostępnych obecnie kamer.

Autor rozprawy formułuje dwuczłonową tezę (tłumaczenie recenzenta):

- "Ilościową ocenę powiększania rozdzielczości obrazów można skutecznie przeprowadzić przy użyciu rzeczywistych zbiorów danych, w których obrazy o niskiej i wysokiej rozdzielczości są pozyskiwane przez różne satelity i wykazują zmienność czasową."
- "Metody powiększania rozdzielczości obrazów mogą zwiększyć użyteczność hiperspektralnych danych satelitarnych w praktycznych zastosowaniach."

Tezę wskazuje na zajęcie się problemami oceny skuteczności algorytmów służących do zwiększania rozdzielczości zdjęć satelitarnych oraz wpływem zwiększania rozdzielczości na skuteczność analizy treści tych zdjęć.

Wspomniane zagadnienia są aktualnym problemem naukowych, kluczowym dla powszechnego wykorzystania zdjęć satelitarnych. W szczególności problem dotyczy kamer wykonujących zdjęcia multispektralne, w których zwiększenie rozdzielczości spektralnej związane jest z redukcją rozdzielczości przestrzennej.

Rozprawa ma charakter eksperymentalno-analityczny. Doktorant prezentuje dostępne zbiory obrazów satelitarnych, dobiera techniki zwiększania ich rozdzielczości, przygotowuje dane umożliwiające ocenę skuteczności działania tych technik. Prezentuje również rezultaty projektu PIGEON, w których zwiększanie rozdzielczości obrazów wykorzystane zostało do poprawy oceny stanu środowiska.

2 Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W rozprawie obszernie omawiana jest tematyka zwiększania rozdzielczości obrazów, w tym multispektralnych zdjęć satelitarnych. Autor przedstawia szczegółowy przegląd literatury związanej z tą tematyką, uwzględniający zarówno klasyczne techniki oparte na przetwarzaniu obrazów, jak i algorytmy bazujące na wykorzystaniu sieci neuronowych. Praca obejmuje również przegląd zbiorów danych tworzonych w oparciu o zdjęcia wykonywane przez różne satelity. Wymienione treści świadczą o szerokiej wiedzy autora w zakresie związanym z tematyką rozprawy.

Moja jedyna uwaga dotyczy zbyt szerokiego zakresu tych opisów, które, w dobie dostępności automatycznych narzędzi do tworzenia tego typu opracowań, powinny koncentrować się tylko na pozycjach literaturowych bezpośrednio związanych z tematyką przeprowadzonych badań.

3 Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Głównymi osiągnięciami prezentowanymi w rozprawie są:

- Opracowanie zbioru zdjęć satelitarnych, nazwanego MuS2, służącego do testowania algorytmów MISR (ang. multi-image super-resolution). Cechą tego zbioru jest wykorzystanie zdjęć pochodzących z różnych satelit do oceny jakości rekonstrukcji wysokorozdzielczej tego samego terenu.
- Dobór algorytmów zwiększania rozdzielczości multispektralnych obrazów satelitarnych pod kątem ich wykorzystania w wybranych zadaniach monitorowania środowiska.

Doktorant opracował zbiór obrazów satelitarnych MuS2, składający się ze zdjęć wykonanych przez satelity Sentinel-2 and WorldView-2. Wybrany został podzbiór zdjęć reprezentujący uwspólnione cztery kanały spektralne obu satelit. Dzięki takiemu zabiegowi MuS2 zawiera zarówno zestaw obrazów o niskiej rozdzielczości przestrzennej zawierających różne pasma częstotliwości, jak również ich odpowiednik o wyższej rozdzielczości. W ten sposób zapewniona została możliwość porównania wyników działania testowanego algorytmu zwiększającego rozdzielczość obrazu z referencją o wysokiej rozdzielczości.

Głównym wyzwaniem w czasie tworzenia zbioru MuS2 było zmniejszenie różnic w treściach zdjęć wykonywanych przez różne kamery w różnym czasie. Autor wykorzystał do tego celu szereg technik przetwarzania obrazów przybliżających do siebie obrazy w rozumieniu położenia przestrzennego. Sformułowana została metryka oceniająca różnice pomiędzy obrazami poprzez uśrednienie wyników metryk PSNR, LPIPS i SSIM. Dodatkowo dla każdego zbioru obrazów przedstawiających wybrany obszar terenu obliczana była maska wskazująca, które piksele z obrazów powinny być wyłączone z procesu oceny działania algorytmu zwiększającego rozdzielczość.

Zbiór obrazów MuS2 wykorzystany został do przetestowania skuteczności działania dwóch technik MISR (HighRes-net i RAMS) oraz jednej techniki SISR (ang. single image super-resolution). Analizę wyników oparto na wykorzystaniu wspomnianych metryk porównujących parami obraz referencyjny i uzyskany w wyniku działania algorytmu zwiększającego rozdzielczość. Skuteczność metryk PSNR i SSIM podważona została poprzez porównanie wyników zaawansowanych algorytmów MISR z prostym powiększaniem obrazów za pomocą filtrowania. Te ostatnie techniki uzyskują lepsze wyniki liczbowe co jest sprzeczne z manualną oceną powiększonych obrazów. Spójniejsze wyniki uzyskane zostały dla metryki LPIPS, która w większości przypadków wskazuje na przewagę technik MISR.

Wiarygodność zaprezentowanej analizy oparta jest na manualnej ocenie jakości obrazów. Autor udostępnił w pracy tylko kilka przykładów ilustrujących problem. *Wskazane byłoby udostępnienie (np. w materiałach dodatkowych) liczniejszych przykładów uzyskanych wyników.* Doktorant zamieszcza w pracy wyniki eksperymentu percepcyjnego, w którym obrazy porównywane były przez ludzi. Opis tego eksperymentu jest jednak zdawkowy, a w pracy nie znalazłem informacji czy jego wyniki zostały opublikowane. Autorem eksperymentu jest też inna osoba. Zakładam, że dane z Tab. 5.1 pokazują uśrednione wyniki dla różnych zestawów obrazów z bazy MuS2. W takim wypadku interesujące byłoby zbadanie istotności statystycznej różnic pomiędzy poszczególnymi technikami (np. jakiegoś testu opartego na analizie wariancji). *Zachęcam Autora do zaprezentowania takich danych w czasie obrony pracy.*

Kolejny cel badawczy dotyczy wykorzystania metod powiększania rozdzielczości obrazów satelitarnych do oceny stanu środowiska. W szczególności do oznaczania zawartości azotu w glebie, oceny zanieczyszczenia powietrza poprzez ekstrakcje kolumny NO₂ oraz do oceny jakości wody poprzez pomiar koncentracji chlorofilu. W pierwszym i trzecim zadaniu wykonano fuzję obrazów multispektralnych oraz panchromatycznych pochodzących z satelity PRISMA. Wykorzystano również techniki SISR. Do oceny zanieczyszczenia powietrza dokonano fuzji obrazów o wysokiej rozdzielczości przestrzennej pochodzących z satelity PRISMA z obrazami o wysokiej rozdzielczości spektralnej z satelity TROPOMI. Istotą wymienionych badań była możliwość porównania wyników opartych na analizie obrazów o powiększonej rozdzielczości z danymi referencyjnymi zarejestrowanymi za pomocą klasycznych metod pomiarowych. Wymienione badania prowadzone były w ramach projektu PIGEON, którego Doktorant był jednym z wykonawców. W pracy zadeklarował, że w przypadkach oceny jakości gleby i wody, jego zadania koncentrowały się na metodach SISR, tzn. technikach Bi-3DQRRN [Fu i inni, 2021] oraz HAT [Chen i inni, 2023].

Ocena rezultatów badań technik SISR zaprezentowana została w formie porównania powiększanych obrazów do obrazów referencyjnych - w przypadku metody symulacyjnej z pomniejszaniem obrazów bazowych lub pomniejszenia powiększonych obrazów i porównania ich do obrazów źródłowych - w przypadku oceny rzeczywistych rezultatów. Wyniki wyrażono za pomocą metryk PSNR, SSIM i SAM. Moim zdaniem wyniki nie wskazują na przewagę zaawansowanych technik powiększania rozdzielczości nad klasycznym algorytmem interpolacyjnym. Powodem może być dobór metryk, konkretniej brak metryki porównującej obrazy na różnych poziomach częstotliwości. *Proszę o przedyskutowanie tego problemu w czasie obrony pracy dyplomowej. Proszę również o wykonanie analizy statystycznej i wskazanie czy istnieją różnice w wynikach pomiędzy poszczególnymi algorytmami rozumiane jako istotne pod względem statystycznym.*

Ciekawszą częścią oceny algorytmów SISR jest porównanie wyników ich działania do danych referencyjnych zbieranych klasycznymi metodami. Konwersja cech obrazów do fizycznych jednostek pomiarowych oparta została na technice MLP (ang. multilayer perceptron). O ile dobrze rozumiem, dla każdego zestawu obrazów, tzn. np. zestawu obrazów oryginalnych lub zestawu obrazów powiększonych za pomocą wybranej techniki SISR, sieć MLP wytrenowana została dla podzestawów treningowego i walidacyjnego, a ostateczną ocenę rezultatów oparto na analizie obrazów z grupy testowej. Wyniki prezentowane w formie tabeli (Tab. 6.4) tylko w jednym przypadku (HAT dla zanieczyszczenia wody) wskazują na przewagę techniki SISR. Różnice pomiędzy średnimi wynikami są nieznaczne, dlatego uważam, że należałoby wykorzystać rozszerzoną analizę statystyczną do wykazania różnic pomiędzy badanymi technikami. *Sugeruję przygotowanie takiej analizy i zaprezentowanie wniosków w czasie obrony. Dlaczego zastosowano takie, a nie inne podziały na zbiory treningowe, walidacyjne i testowe (patrz Tab. 6.3) ?*

W przypadku porównywania wyników oceny stanu powietrza uzyskiwanych z fuzji obrazów satelitarnych z danymi naziemnymi uzyskana została poprawa współczynnika Pearsona, RMSE oraz MAE (ang. "mean absolute error"). Podobnie jak w poprzednich przypadkach wskazane byłoby potwierdzenie tych wyników na drodze wskazania istotności statystycznej pomiędzy wynikami uzyskiwanymi dla oryginalnych i powiększonych obrazów.

4 Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Autor podejmuje się trudnego zadania fuzji danych obrazowych pochodzących z różnych kamer umieszczonych na różnych satelitach i wykonujących pomiary w różnym czasie. W pracy zaprezentowane zostało oryginalne rozwiązanie takiego problemu na przykładzie powstawania zbioru obrazów MuS2. Przeanalizowano przyczyny występowania różnic między obrazami i zaproponowano techniki redukcji tych różnic. Oryginalnym rozwiązaniem są prace realizowane w ramach projektu PIGEON, w których techniki powiększania rozdzielczości obrazów satelitarnych skonfrontowane zostały z rzeczywistymi danymi rejestrowanymi za pomocą klasycznych badań naziemnych. Wskazano możliwości polepszenia wyników analizy poprzez fuzję danych z różnych satelit polegającą na powiększaniu ich rozdzielczości przestrzennej i spektralnej.

5 Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników / zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Praca jest napisana i zredagowana w staranny sposób. Styl i poprawność językowa wskazuje, że użyty język angielski nie jest natywnym językiem Autora, jednak pracę uważam za zrozumiałą. Opisy ilustrowane są licznymi rysunkami oraz zdjęciami efektywnie wspierającymi prezentację rezultatów.

W części rozdziałów Autor przyjął ablacyjny sposób prezentacji wyników, co prowadzi do trudności z wyłowieniem najistotniejszych elementów jakim są możliwie najefektywniejsze sposoby rozwiązania problemów. Moim zdaniem jest to szczególnie widoczne w Rodz. 6, w którym nie można jednoznacznie stwierdzić, które wyniki Doktorant uznaje za najlepsze, tzn. które techniki zwiększania rozdzielczości są preferowane.

6 Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Słabszą stroną rozprawy są analizy danych porównujące cechy powiększonych zdjęć satelitarnych. Autor przeprowadza testy na zbiorach kilku bądź kilkunastu obrazów, natomiast w tabelach prezentuje tylko średnie wartości współczynników. Na podstawie wartości średniej nie można jednoznacznie stwierdzić, że dana technika generuje lepsze wyniki od innej. Analiza statystyczna jest szczególnie istotna w przypadku prezentowanych w pracy badań porównawczych, ponieważ wykorzystywane są w nich niepewne dane referencyjne. Zdjęcia o wysokiej rozdzielczości przestrzennej mające stanowić referencję dla powiększonych zdjęć multispektralnych wykonywane są przez inne kamery i w innym czasie, dlatego podlegają licznym modulacjom. Dane z pomiarów naziemnych mają inną rozdzielczość i czas wykonania. W związku z powyższym zachodzi obawa, że szum związany z niepewnością danych referencyjnych może fałszować porównywanie technik zwiększania rozdzielczości.

7 Jaka jest przydatność rozprawy do nauk technicznych?

Analiza obrazów satelitarnych jest aktualnym i rozwijającym się obszarem badawczym. Prezentowana w pracy fuzja obrazów wykonanych różnymi kamerami i pochodzących z różnych satelit jest szczególnie istotna z uwagi na coraz liczniejsze i powszechniejsze wykorzystywanie wykorzystanie kamer satelitarnych. Prezentowany zbiór obrazów MuS2 jest przykładem jak można rozwiązać problemy związane z fuzją zdjęć wykonanych za pomocą kamer o różnej charakterystyce spektral-

nej. Natomiast analiza zdjęć, której wyniki porównywane są do danych referencyjnym pokazuje jak można skutecznie mierzyć fizyczne elementy o dużej skali stosując obrazowanie satelitarne.

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- **spełniająca wymagania**
- spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Stwierdzam, że Autor wniósł istotny wkład do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w zakresie rozwoju technik przetwarzania obrazów satelitarne. Uważam, że przedłożona do recenzji rozprawa spełnia wymagania właściwej Ustawy i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Radek Radek



Politechnika Łódzka

Institut Informatyki

Łódź, 10 marca 2025 roku

prof. dr hab. inż. Adam Wojciechowski
Institut Informatyki
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej
Politechnika Łódzka
Al. Politechniki 8, 93-590 Łódź

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Super-resolution Algorithms and Evaluation Procedures for Satellite Imagery Data**

Autor rozprawy: **mgr inż. Paweł Kowaleczko**

Promotor rozprawy: **prof. dr hab. inż. Przemysław Rokita**

Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Pan mgr inż. Paweł Kowaleczko podjął w swojej pracy doktorskiej zagadnienie rekonstrukcji nadrozdzielczej obrazów satelitarnych. Tematyka rozprawy dotyczyła zarówno metod rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych jak i procedur ich ewaluacji. Zagadnienie naukowe zostało bardzo precyzyjnie sformułowane i wyjaśnione.

W badaniach postawiono dwie główne hipotezy badawcze. Pierwsza odnosi się do możliwości przeprowadzenia oceny ilościowej nadrozdzielczych obrazów zrekonstruowanych w oparciu o rzeczywiste zbiory danych, rejestrowane przez różne satelity, z różną rozdzielczością przestrzenną i czasową. Druga postuluje wzmocnienie użyteczności hiperspektralnych obrazów satelitarnych, uzyskiwanych metodami nadrozdzielczymi, w praktycznych badaniach środowiskowych. Udowodnienie postawionych hipotez wymagało opracowania spójnego zbioru danych satelitarnych złożonego zarówno z obrazów wysokiej jak i niskiej rozdzielczości, rejestrowanego przez różne satelity. Opracowania procedury oceny ilościowej uzyskiwanych wyników, uwzględniając wyzwania wynikające z heterogenicznych systemów akwizycji. Opracowania metod generowania obrazów hiperspektralnych o zwiększonej rozdzielczości przestrzennej, znajdujących zastosowanie w zaawansowanych problemach monitorowania środowiska.

Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna, ważna oraz dobrze postawiona. Rosnąca liczba satelitów rejestrujących obrazy Ziemi w różnej rozdzielczości i w różnym spektrum fal daje pozór komplementarności, ale dopiero próba integracji zebranych danych oraz ich analizy ujawnia wyzwania towarzyszące analizie hiper/multi-spektralnych obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej i czasowej. Równoczesny rozwój sztucznej inteligencji w zadaniach teledetekcji prowadzi niejednokrotnie do przyczynkowych, słabo generalizowalnych wyników, a prace badawcze Doktoranta wpisują się w niezwykle cenny nurt systematyzowania i wyjaśniania badań z zakresu teledetekcji obrazowej.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, ale nosi w sobie istotny potencjał praktyczny. Przedstawione w pracy rozważania koncentrują się zarówno na uniwersalnych, ilościowych miarach oceny obrazu jak i na ocenie przydatności obrazów nadrozdzielczych w konkretnych zadaniach monitorowania środowiska. Przedstawione analizy są mocno pogłębione i bardzo profesjonalne.

Analiza wyników jest mocno inspirująca i otwiera wiele kontekstów dla kolejnych badań. Praca z racji podjętej problematyki, zakresu oraz metodologii badawczej jest pełnoprawnym osiągnięciem o charakterze naukowym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle) świadczącą o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej, usystematyzowanie stanu wiedzy, w przedmiotowym zakresie jest, moim zdaniem, pierwszym z osiągnięć Doktoranta. Choć nominalnie dwa pierwsze rozdziały są poświęcone analizie aktualnego stanu zagadnienia, to bezsprzecznie prawie każdy rozdział wprowadza i systematyzuje kluczowe obszary związane z generowaniem i oceną nadrozdzielczych obrazów satelitarnych. I tak rozdział drugi odwołuje się do klasycznych metod zmiany rozdzielczości, trzeci rozdział zwraca uwagę na funkcje kosztu (różnic pomiędzy obrazami), które znajdują zastosowanie w rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych z użyciem głębokich sieci neuronowych. Rozdział czwarty poświęcony jest zbiorom danych satelitarnych. Rozdział piąty poświęcony jest miarom jakości obrazów. Przegląd jest merytoryczny i aktualny. Metody literaturowe zostały poprawnie omówione oraz uzupełnione cennymi schematami, które pozwalają lepiej zrozumieć wartość dodaną rozwiązań Doktoranta przedstawionych w dysertacji. Co więcej, każda odsłona przeglądu płynnie wprowadza czytelnika w aspekt badań prowadzonych przez Doktoranta.

Bibliografia jest obszerna i liczy 157 pozycji, w tym 8 z udziałem Doktoranta. Doktorant raportuje ponadto aż 15 opublikowanych prac, w których większości był odpowiedzialny za oprogramowanie metod i badania, a w niektórych za konceptualizację badań. Prace powiązane z doktoratem ukazały się głównie w latach 2022-2024, co świadczy o dużej dynamice badań, szczególnie w ostatnim okresie i współpracy z bardzo dynamicznym zespołem naukowym, o czym świadczą powtarzające się nazwiska współautorów prac. W dorobku znajdują się prace w tak renomowanych czasopismach z listy JCR jak *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (IF=4.7), *Scientific Data* (IF=5.8), czy *Signal Image and Video Processing* (IF=2.0). Całokształt dokonań publikacyjnych Doktoranta jest pokaźny i stanowi cenne źródło odniesień do literatury światowej w przedmiocie badań.

Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W obszarze podjętej problematyki, Doktorant bardzo merytorycznie i rzetelnie przeprowadził analizę problemu, określił kluczowe etapy prac badawczych, zaproponował oryginalne rozwiązania lub współtworzył nowe metody, po czym systematycznie przeprowadzał eksperymenty wspierające postawione hipotezy, co systematycznie wspierało kontrybucje Doktoranta.

W pierwszej kolejności Doktorant usystematyzował terminologię w dość mocno eksplorowanym i skomplikowanym obszarze badań. Jest to niezwykle cenne z racji na złożoność operacji i wariantów w przetwarzaniu i analizie nadrozdzielczych obrazów wielo/hiper-spektralnych. Szczególną uwagę poświęcił klasycznym funkcjom interpolacji obrazów oraz głębokim sieciom neuronowym, w ramach których przeanalizował funkcje straty (ang. *loss function*), stosowane w uczeniu modeli sieci neuronowych, które bezpośrednio odnoszą się do porównywania analizowanych obrazów, przy licznych niedoskonałościach i charakterystykach obrazów zbieranych przez sensory zainstalowane na różnych satelitach. Przegląd literatury jest aktualny i drobiazgowy. Doktorant ujął przegląd w kilku nurtach rekonstrukcji obrazów hiper-spektralnych: na podstawie pojedynczego obrazu (SISR), na

podstawie wielu obrazów (MISR), z użyciem fuzji obrazów wielo-spektralnych i hiper-spektralnych (HSI-MSI), czy panchromatycznego wyostrażania. Dla kaźdego z nurtów zaproponował literaturowe rozwiąźania referencyjne, które były wykorzystywane na dalszych etapach badań.

Rozdział czwarty został poświęcony analizie istniejących zbiorów zdjęć satelitarnych, które ze względu na różne przeznaczenie i okres umieszczenia na orbicie Ziemi cechują się dużą różnorodnością charakterystyk rejestrowanych obrazów. Ciekawe poznawczo jest zebranie w jednym opracowaniu charakterystyk spektralnych i rozdzielczościowych obrazów z poszczególnych satelitów oraz opisanie specyfiki ich pracy. Zwińczeniem rozdziału jest opisanie autorskiego zbioru danych MuS2, który został opracowany i przekazany środowisku naukowemu jako unikalne (jedno z trzech) źródło obrazów referencyjnych do badań nad nadrozdzielczą obserwacją Ziemi. Ze względu na rozbieżności w zakresie dokładności zrekonstruowanych obrazów nadrozdzielczych, raportowane również przez innych autorów, Doktorant podjął się zaproponowania procedury ewaluacyjnej dla nadrozdzielczych sieci neuronowych. To niezwykle wartościowe i ważne osiągnięcie, które integruje wybrane obrazy z dwóch satelitów (Sentinel-2 i WorldView-2) oraz standaryzuje badania nad uczeniem i walidacją jednoobrazowych oraz wieloobrazowych metod nadrozdzielczych. Rejestracja obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej, różnej charakterystyce spektralnej i przede wszystkim różnym czasie akwizycji (różnica kilku lat) było zadaniem trudnym, ale zostało przeprowadzone w wiarygodny i rzetelny sposób. Zostały w tym celu zaproponowane dedykowane maski, które pozwalają wyłączać z analizy obszary niespójności i unifikują przestrzeń odpowiadających sobie fragmentów obrazów, które powinny stanowić osnowę kolejnych badań.

Rozdział piąty przedstawia pogłębione studium ewaluacji obrazów nadrozdzielczych. Doktorant mając w swoim portfolio zbiór doświadczeń związanych z przetwarzaniem rzeczywistych obrazów satelitarnych i towarzyszących im niespójnościom, podzielił proces oceny na badania jakościowe i ilościowe, chociaż badaniom ilościowym poświęcił znacznie więcej uwagi. Oprócz klasycznych miar ilościowych tj. PSNR, RMSE, czy SSIM stosowanych najczęściej do względnej oceny obrazów, przytoczono rzadziej spotykane, lecz ciekawe miary percepcyjne (LPIPS), miary uwzględniające aspekty spektralne (SAM, ERGAS), czy korelacje (CC) i indeksy jakości obrazu (Q, QND). Analiza obrazów ze zbioru MuS2 zwróciła uwagę Doktoranta na rozbieżności histogramów, czy bias jasności pomiędzy porównywanymi obrazami. Na tej podstawie Autor zaproponował skorygowane miary cPSNR, cSSIM oraz zbalansowaną miarę uwzględniającą miary cPSNR, cSSIM i LPIPS, liczone dla obrazów nadrozdzielczych otrzymywanych interpolacją bikubiczną w stosunku do obrazu referencyjnego, co pozwala dokładniej ocenić jakość rekonstrukcji. Doktorant zaproponował też ciekawe maskowanie obszaru zainteresowania, które odpowiada na różnice w rejestrowanych obszarach, pojawiających się w wyniku ingerencji człowieka na przestrzeni lat, czy różnic w sensorach. Przeprowadzone na zbiorze MuS2 eksperymenty wykazały niespójność miar ilościowych (cPSNR, cSSIM) i uśrednionej oceny użytkowników (MOS) w odniesieniu do obrazów nadrozdzielczych uzyskiwanych metodami interpolacji oraz obrazów uzyskiwanych technikami MISR. Chociaż dokładny mechanizm tworzenia masek (rys. 5.3) nie został dokładnie opisany w dysertacji to bezsprzecznie jest to komponent urealnijający ocenę złożonych zbiorów danych pochodzących z różnych satelitów. Zwińczeniem prac nad zbiorem MuS2 było opracowanie referencyjnych (*benchmarkowych*) wartości miar dla nowych sieci MISR generujących nadrozdzielcze obrazy z kilku obrazów źródłowych. Wartości referencyjne zostały opracowane z użyciem metod *HighRes-net*, *RAMS* i skalowania z użyciem tradycyjnej interpolacji, w oparciu o zaproponowane miary przy różnych wariantach maskowania. Wykazano również zbieżność miary LPIPS z uśrednioną miarą jakościową odnoszącą się do percepcji obrazów przez obserwatorów. Wykazano również przydatność bazy MuS2 dla ewaluacji technik SISR, dokonujących rekonstrukcji wysokorozdzielczej na podstawie jednego obrazu. W oparciu o uczoną od nowa lub zaadaptowaną architekturę HAT zaproponowano referencyjne wartości miar.

Ostatni z kluczowych rozdziałów rozprawy poświęcony jest badaniom zrealizowanym w ramach europejskiego projektu o akronimie PIGEON, finansowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną, w którym Doktorant był współwykonawcą. Badania praktyczne dotyczyły monitorowania warunków środowiskowych, w tym: oceny zawartości azotu w glebie, oceny zanieczyszczenia powietrza, czy oceny jakości wody. W każdym przypadku markerami zjawisk była obecność określonych związków chemicznych i biologicznych, rejestrowanych przez dedykowane spektralne sensory. W zależności od typu zjawiska, bazowano na dedykowanych zbiorach danych (PRISMA, TROPAMI) i adekwatnych literaturowych metodach rekonstrukcji nadrozdzielczej, m.in.: *HyperTransformer*, *MLP DNN*, bazującym na *PCA* panchromatycznym wyostrzaniu, *Bi-3DQRNN*, czy *HAT*, z których niektóre wymagały odpowiedniej adaptacji. Doktorant zamieścił w rozprawie ocenę rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych, którą przeprowadził w dwóch odśłonach: niezależnej od zadania i zależnej od zadania projektowego. Ocena niezależna od zadania odbywała się w oparciu o miary PSNR, SSIM i SAM, zaś ocena modeli w kontekście zadania praktycznego używała miar dopasowania R^2 , RMSE, MAE i współczynnika korelacji Pearsona. Eksperymenty były przeprowadzone w rzetelny i przekonujący sposób oraz doprowadziły do wskazania liderów rekonstrukcji nadrozdzielczej w poszczególnych odśłonach zadania. Jedynie w ocenie jakości wód nastąpiło zaskakujące odwrócenie hierarchii najlepszych rozwiązań.

Dysertację wieńczy rozdział podsumowujący wkład w dyscyplinę naukową oraz zalety i wady zaproponowanych rozwiązań, z którymi w pełni się zgadzam. Hipotezy badawcze, które sformułowano na początku pracy należy uznać za udowodnione. Doktorant zaproponował również perspektywę dalszych badań, co jest wartościowe i skłania do refleksji.

Podsumowując, przedstawione rozwiązania, eksperymenty oraz wyniki są ciekawe i nowatorskie. Szczególnie inspirująca, choć w pewnym sensie niedopowiedziana (trzeba sięgać do publikacji referencyjnej), jest procedura integracji różnych zbiorów danych, która pozwala lepiej zrozumieć własności i ograniczenia hiperspektralnych satelitarnych obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej i czasowej.

Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy, czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy doktorskiej leży przede wszystkim w szeroko pojętym usystematyzowaniu i ewaluacji aktualnego stanu wiedzy w zakresie rekonstrukcji nadrozdzielczych obrazów hiperspektralnych. W szczególności najważniejszymi, moim zdaniem, osiągnięciami są:

- publikacja kompleksowego przeglądu literatury dotyczącego nadrozdzielczego obrazowania satelitarnego;
- opracowanie unikalnego zbioru danych rzeczywistych MuS2, który przyczynia się do rozwoju badań w zakresie wieloobrazowych, nadrozdzielczych metod rekonstrukcji obrazów oraz zaproponowanie procesu ewaluacji tych metod;
- opracowanie rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych pochodzących z baz PRISMA i TROPAMI w wybranych aspektach monitorowania stanu środowiska: stan gleby, czystość powietrza i wody;

Wymienione osiągnięcia stanowią bezsprzecznie oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Praca stanowi bardzo szerokie i dogłębne opracowanie z zakresu rekonstrukcji nadrozdzielczych obrazów o szerokiej rozdzielczości spektralnej, na podstawie obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej i czasowej. Większość elementów pracy została opublikowana w renomowanych czasopismach i na dziedzinowych konferencjach, co w naturalny sposób obniżyło cierpliwość Doktoranta do powielania wszystkich szczegółów rozwiązań na łamach dysertacji. Ten fakt wyjaśnia powierzchowność niektórych wyjaśnień, które można suplementować sięgając do prac źródłowych. Można uznać, że opracowanie stanowi kompromis pomiędzy zakresem badań i zwyczajową objętością rozprawy. Docenienia wymaga spójny i przyjemny w lekturze układ pracy, który wplata, w aktualny stan zagadnienia, badania prowadzone przez Doktoranta. Pracę czyta się bardzo dobrze. Z drugiej strony dysertacja doktorska powinna uwypuklać autorski wkład Doktoranta w uprawianą dyscyplinę, a w tym zakresie nie zawsze udało się zachować czytelny podział pomiędzy osiągnięciami członków prężnego i dużego zespołu naukowego oraz samego Doktoranta. Wątpliwości wyjaśnia dopiero rozdział 7, który był bardzo przydatny.

Pod względem edycyjnym praca została zredagowana bardzo starannie, choć jak zaznaczył Autor, kwestie stylistyczne są również zasługą modelu językowego, którego ingerencja została ograniczona do korekt językowych. Praca zawiera wszystkie niezbędne spisy oraz użyteczne zestawienia oznaczeń i skrótów. Na uwagę zasługuje wielość i jednoczesna spójność oznaczeń, która pozwala na śledzenie kolejnych usprawnień w ramach uprawianego obszaru badań. Utrudnieniem jest za to format opracowania, który powoduje, że niektóre teksty i opisy są po prostu nieczytelne, np. opisy bloków na rys. 5.1, czy opisy osi na wykresach z rysunku 6.9 i 6.10. Osobną kwestią są obrazy satelitarne, które z racji swojej złożoności też są trudne w analizie w formie wydrukowanej, ale szczęśliwie Autor odsyła czytelnika, za pomocą kodu QR, do zasobów elektronicznych o nieporównywalnie lepszej jakości.

Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Rozprawa doktorska nie zawiera istotnych uchybień, a poniższe uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny. Przykładowe kwestie, które mogłyby zostać omówione, lecz nie ujmują pozytywnej oceny rozprawy, dotyczą:

- przeanalizowania motywacji i wyjaśnienia przesłanek stojących za algorytmem agregacji masek, opracowanych dla zbioru MuS2 (rozdział 5.2.1); Czy brak determinizmu sieci neuronowych oraz liczba modeli branych pod uwagę podczas tworzenia zagregowanych masek może mieć wpływ na ich finalny kształt?
- przedyskutowania wpływu danych spektralnych na rekonstrukcję obrazów nadrozdzielczych; Przetwarzane obrazy satelitarne cechują się zarówno różną rozdzielczością przestrzenną jak i spektralną, przy czym badania zdają się koncentrować głównie na rozdzielczości przestrzennej i cechach obrazu nieadresujących szczególnie zakresu spektralnego. Aspekty spektralne pojawiają się głównie w niektórych funkcjach kosztu. Czy wpływ danych spektralnych na jakość rekonstrukcji nadrozdzielczej jest rzeczywiście niewielki?
- przeanalizowania w jakim zakresie, dla metod opartych o sieci neuronowe, Doktorant realizował adaptacje modeli? Czy adaptacja ograniczała się do przystosowania modeli do rozmiarów wektorów (obrazów) wejściowych. Czy dla użytych modeli prowadzone były optymalizacje hiperparametrów lub inne usprawnienia?

Konkluzja

Uważam, że cele rozprawy doktorskiej zostały w pełni zrealizowane, a postawione hipotezy bezspornie udowodnione. Doktorant przedstawił w rozprawie nowe i oryginalne procedury

ewaluacji metod rekonstrukcji nadrozdzielczych obrazów satelitarnych oraz udostępnił środowisku wartościowy i unikalny zbiór danych, stanowiący uznaną (21 cytowań w Google Scholar na dzień sporządzania recenzji) referencję dla społeczności naukowej. Uzyskane przez Doktoranta wyniki uważam za oryginalne, wartościowe i ciekawe poznawczo. Zakres prowadzonych badań był szeroki, analiza opracowanych rozwiązań wszechstronna, a warsztat badawczy Doktoranta zasługuje na wyróżnienie. Wyróżniająca jest również działalność publikacyjna Doktoranta, która prowadzona była w prężnym zespole badawczym i potwierdza jakość opracowanych metod. Doktorant może poszczycić się 12 publikacjami w okresie 3 ostatnich lat prowadzenia badań (2022-2024), w tym znajdują się trzy publikacje z listy *JCR*. Doktorant może poszczycić się również aktywnością projektową (projekt PIGEON), która stanowi ważne uzupełnienie jego dorobku i daje szansę na kontynuowanie ambitnych badań.

Tym samym rozprawa prezentuje wartościowe osiągnięcia naukowe w obszarze dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej.

Bez najmniejszej wątpliwości stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przez obowiązującą ustawę. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Rozważam również złożenie wniosku o wyróżnienie rozprawy, argumentując swój wniosek wartością naukową opracowanych rozwiązań, zakresem i wnikliwością przeprowadzonych eksperymentów badawczych oraz znamienitym dorobkiem publikacyjnym, ale warunkuję wniosek dyskusją podczas obrony, która jednoznacznie pozwoliłaby określić linię demarkacyjną pomiędzy wkładem naukowym Doktoranta, a osiągnięciami członków prężnego zespołu badawczego, w pracach którego Autor dysertacji intensywnie uczestniczył.

Adam Wojciechowski