



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 rozwiązania 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