

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

