

Prof. Michał Woźniak
Politechnika Wroclawska

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Łukasza Tulczyjewa

zatytułowanej:

***Unmixing of Hyperspectral Images: Where Artificial Intelligence Meets Earth
Observation***

1. Problem badawczy i jego znaczenie

W pracy rozważane są zagadnienia związane z metodami głębokiego uczenia do analizy obrazów nadwielokolorowych (ang. *hyperspectral images*), głównie w celu rozwiązania problemu *hyperspectral unmixing*, polegającego na wykryciu na nich interesujących informacji, tj. wskazania (na poziomie pojedynczych pikseli) jakie pojedyncze materiały są za ich pomocą obrazowane. W tym celu doktorant zaproponował kompletny tor przetwarzania danych nadwielokolorowych, rozwiązując przy tym problemy na jego poszczególnych etapach. Praca ma charakter naukowo-aplikacyjny. Zaproponowane metody zostały poddane ocenie pod kątem wybranych czynników, które mogą wpływać na jakość proponowanego rozwiązania. Ocena jakości zaproponowanych metod została dokonana głównie na drodze eksperymentu komputerowego. Opracowane metody mogą być podstawą do budowy efektywnych systemów analizy obrazów nadwielokolorowych i znaleźć zastosowanie np. do analizy zdjęć satelitarnych na potrzeby rolnictwa, geologii, czy oceny stanu środowiska naturalnego.

2. Wkład autora

Zakres oraz zawartość rozprawy oceniam pozytywnie, jednak zwrócić należy uwagę, że ani cel pracy ani teza nie zostały wprost sformułowane. Jednakże wskazane w rozdziale 2 najważniejsze dokonania świadczą, że od początku swoich badań doktorant miał jasno wyznaczony cel zmierzający do poprawy jakości przetwarzania obrazów nadwielokolorowych w problemie *hyperspectral unmixing*.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- Zaproponowanie protokołu oceny jakości algorytmów analizy obrazów nadwielokolorowych uwzględniających przeciwdziałanie zjawisku *data leakage*, co prowadzić może do otrzymania zbyt optymistycznego oszacowania wartości metryk jakości.

- Analizę wpływu wielkości poetykietowanego zbioru uczącego na jakość algorytmów rozwiązujących problem *hyperspectral unmixing*.
- Zaproponowanie autorskiego modelu integrującego cechy o różnym charakterze, tj. cechy przestrzenne, spektralne i przestrzenno-spektralne.
- Analiza wykorzystania metod kwantyzacji na jakość modelu (dokładność, opóźnienie, zapotrzebowanie na pamięć).
- Opracowanie algorytmu selekcji cech bazującego na programowaniu ewolucyjnym na potrzeby rozważanego problemu.
- Ocena jakości zaproponowanych metod na podstawie eksperymentów komputerowych.

Wyniki uzyskiwane w trakcie pracy nad rozprawą zostały zawarte w pięciu publikacjach (trzy w materiałach konferencji indeksowanych przez CORE, w tym jednej o rankingu A - GECO, a także dwóch czasopismach indeksowanych w JCR: *Remote Sensing* oraz *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*). Dla wszystkich prac precyzyjnie określony został wkład doktoranta w ich powstanie, a także udostępniono repozytoria kodu pozwalające na replikację otrzymanych wyników. Jednakże dorobek publikacyjny doktoranta jest bardzo bogaty i obejmuje 18 dodatkowych publikacji, w tym siedem artykułów w czasopismach indeksowanych w JCR (m.in. *Remote Sensing*, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, czy *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*), a także prace na dobrych konferencjach (m.in. EICIP, czy wokrshopach organizowanych w ramach ICLR, czy SIGCOMM). Taki dorobek należy uznać za ponadprzeciętny na tym etapie kariery naukowej.

3. Poprawność

Struktura pracy nie budzi zastrzeżeń, jednakże na czytelność rozprawy wpłynęłoby na pewno niewyróżnianie kolorem spisów treści, rysunków oraz tabel, a także rezygnacja z dwóch ostatnich spisów. W ich miejsce należałoby raczej zamieścić spis oznaczeń i ewentualnie indeks rzeczowy. Lektura rozprawy prowadzi do sformułowania poniższych uwag.

- Przy opisie badań eksperymentalnych brakuje wskazania na jakie pytania badawcze eksperymenty miały odpowiedzieć.
- W opracowanym protokole ewaluacji brakuje mi szerszej dyskusji, czy zaproponowana metoda gwarantuje, że próbka ucząca i walidacyjna pochodzi z tego samego rozkładu, szczególnie, że modele głębokie są szczególnie wrażliwe na tzw. *out-of-distribution data*. Czy nie warto byłoby zaproponowanie metody oceniającej homogeniczność poszczególnych obszarów obrazu i zagwarantowanie, że są one w pewnym stopniu reprezentowane w obu zbiorach.

- W ocenie wpływu liczby etykiet na jakość *hyperspectral unmixing* brakuje mi pogłębionej dyskusji nie tylko na temat wielkości zbioru, ale także w jaki sposób zbiór poetykietowany był wybierany, a co za tym idzie, czy próbki były reprezentatywne dla rozwiązywanego problemu. Czy nie warto było porównać różnych metod wyboru danych do etykietyzacji (np. z wykorzystaniem uczenia aktywnego), bądź zastosowanie innych metod uczenia aktywnego?
- Czy w rozważnym zadaniu *hyperspectral unmixing* nie przedyskutowano zastosowania metod panshapering? Czy takie podejście jest możliwe, tj. czy z praktycznego punktu widzenia jest możliwość pozyskania z obrazu o większej rozdzielczość?

4. Wiedza kandydata

Na podstawie lektury uważam, że doktorant posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, w szczególności w zakresie głębokich sieci neuronowych, metod przetwarzania obrazów nadwidmowych oraz metod analizy obrazów. Doktorant potrafi poprawnie zaplanować i przeprowadzić eksperyment komputerowy w celu oceny jakości zaproponowanych metod. Przegląd literaturowy dotyczący zagadnień przedstawionych w rozprawie (rozdziały 3 i 4) pozwala stwierdzić, że doktorant posiada aktualną wiedzę z zakresu tematyki rozprawy, a także potrafi dokonać krytycznego przeglądu źródeł w celu wskazania ciekawych kierunków badań. Zawarty w dysertacji spis źródeł literaturowych, zawierający 287 pozycji, jest aktualny i reprezentatywny.

5. Podsumowanie

Doktorant wykazał się w recenzowanej rozprawie właściwie stosowanym podejściem eksperymentalnym oraz dobrą znajomością aktualnej problematyki związanej z projektowaniem systemów analizy obrazów nadwidmowych, analizy obrazów oraz uczeniem maszyn. Zostało to poparte dobrymi studiami literaturowymi, obejmującymi aktualne piśmiennictwo związane z problematyką rozprawy, co świadczy o bardzo dobrej wiedzy doktoranta z tego zakresu. Dla poruszanych problemów doktorant sformułował szereg rozwiązań, które mogą być z powodzeniem stosowane do projektowania torów przetwarzania obrazów nadwidmowych dla zadania *hyperspectral unmixing*. Doktorant przeanalizował wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych, ocenił jakość zaproponowanych metod na tle algorytmów znanych z literatury. Na podkreślenie zasługuje umiejętność krytycznego spojrzenia na otrzymane rezultaty oraz wskazanie słabości zaproponowanych przez siebie rozwiązań, bądź ich ograniczoną stosowalność w innych obszarach, a także zapewnienie dostępów do repozytoriów kodu i w konsekwencji możliwość zreplikowania otrzymanych przez niego wyników.

Recenzowana dysertacja przedstawia rozwiązanie oryginalnego problemu, wzbogacając naszą wiedzę dotyczącą analizy zdjęć nadwidmowych. Zawarte w niej wyniki badań eksperymentalnych wskazują również na możliwość wykorzystania otrzymanych metod w praktyce, w tym w analizę zdjęć satelitarnych.

Przedstawione w punkcie 3 recenzji uwagi mają jedynie charakter dyskusyjno-porządkowy, w żaden sposób nie deprecjonują osiągniętych przez doktoranta rezultatów oraz nie wpływają na wyjątkowo pozytywne wrażenie o przedłożonej rozprawie. Mogą być one przydatne w przypadku dalszego publikowania rezultatów zawartych w rozprawie. Jestem przekonany, że doktorant zdaje sobie sprawę z możliwości kontynuowania rozpoczętej w pracy tematyki, choć szkoda, że nie wskazał w pracy potencjalnych kierunków dalszych badań.

Reasumując, biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami) stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Łukasza Tulczyjewa pt. *Unmixing of Hyperspectral Images: Where Artificial Intelligence Meets Earth Observation* spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, w szczególności:

- Rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.
- Kandydat posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja.
- Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr inż. Łukasza Tulczyjewa do publicznej obrony oraz biorąc pod uwagę oryginalność zaproponowanych rozwiązań, dorobek publikacyjny i dojrzałość naukową Kandydata wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Podpis