

dr hab. inż. Piotr A. Kowalski, prof. AGH
Katedra Informatyki Stosowanej i Fizyki Komputerowej,
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
email: pkowal@agh.edu.pl

Kraków, 10.08.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jarosława Bernackiego pt. „Algorytmy identyfikacji sensorów obrazujących”

1. Uwagi ogólne

Prawną podstawą przygotowania recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jarosława Bernackiego jest Umowa z Politechniką Częstochowską – Wydziałem Inżynierii Mechanicznej I Informatyki reprezentowaną przez Prorektora Pana Profesora dr. hab. inż. Jerzego Wysockiego oraz Dziekana – Panią Profesor dr hab. inż. Małgorzatę Klimek, którą otrzymałem 10 czerwca 2023 r.

Recenzja została przygotowana na podstawie rozprawy doktorskiej. Przedmiotowa praca została zrealizowana pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Rafała Scherera, na Wydziale Inżynierii Mechanicznej I Informatyki Politechniki Częstochowskiej. Recenzowana rozprawa doktorska przedstawiona została w postaci woluminu wydanego przez Doktoranta wraz z płytą CD zawierającą treść dysertacji.

Przedmiotem recenzowanej pracy jest obszerna analiza algorytmów identyfikacji sensorów obrazujących w kontekście zbioru zdjęć IMAGINE. Praca składa się z 6 części oraz trzech dodatków, które głęboko zgłębiają różnorodne aspekty tego zagadnienia. I tak, rozdział 1 stanowi wprowadzenie, ukazując kontekst i znaczenie identyfikacji sensorów obrazujących. Rozwinięte zostają również cele, zakres pracy oraz kluczowe pojęcia. Kolejna część przybliży zbiór zdjęć IMAGINE, specjalnie przygotowany - przez Doktoranta - do testowania algorytmów identyfikacji sensorów. Omówiono zastosowane urządzenia, opisano dostępną stronę internetową, na której zbiór jest udostępniony, oraz przedstawiono metody pozyskiwania zdjęć. W rozdziale 3 skupiono się na przeglądzie zarówno klasycznych, jak i nowatorskich algorytmów identyfikacji sensorów obrazujących. Oprócz znanych podejść literaturowych, zaprezentowano autorskie metody, takie jak MSE-DSI, CompaRe oraz omówiono algorytmy Vignetting-CT

i Distortion-CT. Nie zabrakło również analizy wykorzystania konwolucyjnych sieci neuronowych w procesie identyfikacji. Rozdział 4 to przegląd rezultatów klasyfikacji źródeł przy wykorzystaniu zaproponowanych algorytmów w porównaniu z istniejącymi rozwiązaniami. Skoncentrowano się zarówno na skuteczności klasyfikacji, jak i na wydajności działania poszczególnych algorytmów. Wyniki analiz opierają się na reprezentatywnej próbie nowoczesnych zdjęć. Rozdział 5 dokładnie analizuje statystycznie osiągnięte wyniki, podkreślając potwierdzenie użyteczności proponowanych metod w identyfikacji sensorów. Rozdział 6 to głębokie zanurzenie w odporność algorytmu Lukasa oraz konwolucyjnych sieci neuronowych na wyzwania identyfikacji sensorów obrazujących w obecności różnorodnych zewnętrznych szumów. W tym kontekście proponowana jest również innowacyjna strategia przeciwdziałania identyfikacji sensorów. W Rozdziale 7 następuje staranne podsumowanie całości pracy, prezentując istotne wnioski oraz oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny oraz rysując perspektywy przyszłych badań w tym ciekawym obszarze. Dołączone dodatki traktują o własnościach współczynnika korelacji algorytmu Lukasa, wybranych macierzach pomyłek (dla omawianych algorytmów) oraz opisany został algorytm Lanczosa do próbkowania obrazu. Na samym końcu rozprawy występuje spis rysunków, tabel oraz algorytmów, po czym spis pozycji bibliograficznych, które zostały użyte w recenzowanym dziele. Całość pracy obejmuje 196 stron.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy oraz aspektu badawczego

Rozprawa doktorska Pana mgr. Jarosława Bernackiego opiera się na dysertacji, w której zamiast tezy określono cel pracy jako opracowanie algorytmów identyfikacji sensorów obrazujących w aspekcie ISCI, które działają szybciej niż algorytmy istniejące w literaturze przy jednoczesnym zachowaniu porównywalnej skuteczności identyfikacji. W tym miejscu dodam, iż tak postawiony cel nie należy do najłatwiejszych, gdyż w trackie przeglądu literatury zostało stwierdzone, iż podobne algorytmy cechują się dokładnością w okolicach 95%.

W pracy można wyróżnić wykonanie następujących globalnych zadań, często o charakterze nowatorskim:

- Opracowanie zbioru danych IMAGINE, służącego do testowania algorytmów identyfikacji sensorów obrazujących zawartych w aparatach cyfrowych;

- Opracowanie algorytmu MSE-DSI, algorytmów identyfikacji wykorzystujących analizę wad optycznych (winietowanie, dystorsja obiektywu) oraz algorytmu identyfikacji na podstawie kompaktowej formy cyfrowego odcisku palca sensorów obrazujących;
- Opracowanie algorytmu usprawnienia pracy konwolucyjnych sieci neuronowych, które pozwoliło na przyspieszenie czasu nauki sieci.
- Zbadanie odporności algorytmu Lukasa oraz konwolucyjnych sieci neuronowych na identyfikacje aparatów cyfrowych w oparciu o zdjęcia poddane operacjom zaszumienia;
- Weryfikacja eksperymentalna zaproponowanych metod, mająca na celu wykazanie przydatności zaproponowanych algorytmów w problemie identyfikacji sensorów obrazujących.

Ponadto wartym podkreślenia jest bardzo bogaty dorobek publikacyjny Pana mgr. Jarosława Bernackiego, który obejmuje artykuły w czasopismach naukowych *Forensic Science International: Digital Investigation* (wyd. Elsevier), *Journal of Information and Telecommunication* (wyd. Taylor & Francis), *Multimedia Tools and Applications* (wyd. Springer) czterokrotnie oraz konferencjach typu *International Conference on Computational Science*, *International Joint Conference on e-Business and Telecommunications* czy *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems*. Co więcej z owych 10 prac aż 4 są samodzielnymi pracami Doktoranta.

Niewątpliwie dość ciekawym rozwiązaniem zastosowanym w pracy było przygotowanie zbioru zdjęć o nazwie IMAGINE, który został wykorzystany do testowania algorytmów identyfikacji aparatów. Zbiór ten stanowi połączenie zbiorów prywatnych Autora, oraz kolekcji pochodzącej z internetowego serwisu o nazwie *Optyczne.pl*. Finalny zbiór został udostępniony przez Autora na stronie internetowej.

3. Ocena rozprawy

a. Uwagi krytyczno-polemiczne:

W niniejszej części pokrótce przedstawione zostaną główne mankamenty dysertacji. Ze względu na istotność tejsze części recenzji niniejsze uwagi zostaną przedstawione w punktach, do których łatwiej będzie się odnieść Doktorantowi.

1. W rozdziale 2, w szczególności w części 2.3 występuje swoista instrukcja obsługi – w postaci kodu bash'a, która w pewien sposób odstaje od stylu przejętego w dysertacjach doktorskich, w szczególności Rysunek 2.2. W moim odczuciu tego typu może i ważne informacje należało by jednak umieścić w dodatku technicznym.
2. Szkoda że Doktorant w przypadku opisu symbolu I wskazuje że, jest to obraz, lub obraz kolorowy, a nie nazywa tego symbolu mianem funkcja obrazowa jak zostało to przyjęte w domenie analizy danych obrazowych.
3. Czy we wzorze (3.6) w górnym indeksie nie powinno być symbolu i ?
4. W tekście na stronie 29, pomiędzy wzorami 3.6 oraz 3.7 zostają wprowadzone symbole szumów resztkowych jako $W^{(i)}$, dlaczego indeksowanie ich przechodzi po $i=1, \dots, N$ oraz dlaczego zostało wprowadzone nowe oznaczenie w stosunku do symbolu N ze stron 7 oraz 12 ? Co ma dalsze przełożenie na wzór 3.7 oraz kolejne wzory.
5. Na stronie 34 należałoby doprecyzować co to znaczy że „Algorytm MSE-DSI wymaga wartości $m < M$ i $n < N$, które są znacznie mniejsze, rzędu setek pikseli”. W szczególności należało by szerzej skomentować w jaki sposób proponujemy owe wartości.
6. W opisie algorytmu CompaRe, warto doprecyzować lub jakoś zwizualizować proces generacji nowej macierzy I_0 , w szczególności pokazując co oznacza stwierdzenie „umieszczamy w odpowiednich miejscach wartości obliczonych śladów.”
7. Strona 41. W moim odczuciu należałoby przedyskutować czy przez linię 12 (Algorytm 5) nie tracimy informacji o narożnikach, oczywiście zyskując jedna liczbę. Czy była w trakcie badań podejmowana próba reprezentacji współczynników d_i jako kody łańcuchowe (Freemana)?
8. Strona 48. Ze względu na konieczność użycia większej liczby zdjęć w celu obliczenia wartości współczynnika k , uważam, że ciekawym byłoby zbadanie czy przypadkiem inna miara centralna (np. mediana) nie była by lepsza niż klasyczna średnia arytmetyczna.
9. W moim odczuciu, może łatwiejszymi do zobrazowania jest narysowanie schematu struktury CNN niż opisywanie poszczególnych warstw – strona 50, w szczególności jako ostatnia wymieniana jest warstwa w pełni połączona, ale jak ona wygląda oraz jaką ma funkcje aktywacji tego nie uszczegółowiono w dysertacji ?

10. Proszę o doprecyzowanie co w ramach CNN zostało zrobione jako wkład Doktoranta, oczywiście względem istniejących w literaturze rozwiązań. Czy była to tylko zamiana funkcji Relu na Selu czy znacznie więcej?
11. W pracy nie zostało napisane dlaczego Doktorant korzysta z dwóch konkurencyjnych pakietów obliczeniowych Python oraz Matlab, skoro sieć typu konwolucyjnego jest dostępna w postaci bibliotecznej w każdym z nich ?
12. Strona 57. W pracy brakuje wyjaśnienia w jaki sposób dokonano wyznaczenia parametru k określającego liczbę najbliższych sąsiadów. Czy użyto do tego zadania jakiś specjalistycznych metryk ewaluacyjnych? Notabene wprowadzenie współczynnika sąsiadów jako k stoi w sprzeczności z oznaczeniem współczynnika na stronie 48.
13. Proszę o rozszerzenie postawianego wniosku o treści „Niemniej, wyniki klasyfikacji algorytmu MSE-DSI można uznać za satysfakcjonujące, ponieważ są zauważalnie wyższe od klasyfikacji modelem losowym.”, gdyż w obecnej postaci nie przystoi on randze dysertacji.
14. W rozważaniach dotyczących doboru parametru p (strona 62) jest wiele różnych zaleceń. Czy nie można tego procesu pokazać w bardziej przekonujący sposób, czyli np. z użyciem jakiegoś oszacowania lub choćby wykresu pokazującego słuszność postawionej tezy ?
15. W dysertacji nie określono w jaki sposób były uczone CNN, czy do tego celu było wykorzystywane podejście GPU czy CPU ?
16. Muszę przyznać, że podsumowanie badawcze robi ogromne wrażenie i widać, że Doktorant włożył wiele pracy i czasu w przygotowanie wyników i analiz. Jednak w wielu przypadkach pokazywane są wyniki w różnych konfiguracjach, często nieporównywalnych. Zatem naturalną konsekwencją może być przygotowanie globalnej tabeli (lub tabel) zbiorczej, porównującej wszystkie metody oraz różne aspekty badawcze, które są zbadane w ten sam sposób. Dzięki temu z łatwością można było by szybkim „rzutem oka” porównać otrzymane wyniki. Być może dobrym posunięciem byłoby zdefiniować reprezentatywny zbiór bazowy i względem niego dokonać obliczeń porównawczych.

17. Na stronie 87, opisywane są poziomy (skale) nominalna oraz porządkowa, ale w moim odczuciu nie występują one w doktoracie, zatem ich opis nie ma większego znaczenia.

18. W punkcie 5.3 została powtórzona informacja z początku rozdziału.

b. Uwagi szczegółowe i techniczne

W ramach tego punktu, muszę podkreślić bardzo staranne przygotowanie całego woluminu z pracą doktorską. Oczywiście można tu wskazać kilka uwag związanych z pojedynczym brakiem wyjaśnień symboli czy dość skąpym opisem pewnych części pracy. Dla przykładu podam, że czarno-białe składowe rysunku 1.1 są nieczytelne, podobnie rys 3.1, czy kilkukrotne powtórzenie wzoru $N=I-F(I)$ wraz z opisem występujących symboli (strona 7 i 12). W tym miejscu jednak chciałbym również zaznaczyć, iż Doktorant w pracy używa określenia macierz konfuzji zamiast polskiej nazwy jaką jest macierz pomyłek. Co jest typowym makaronizmem vel zapożyczeniem językowym określenia „Confusion matrix” z języka angielskiego. Doktorant również nie ustrzegł się nielicznych mankamentów natury technicznej takich jak błędy interpunkcyjne czy też pomyłki w oznaczeniach (o których nadmieniano wcześniej), itp. jednak w żadnej mierze nie rzutują one na relatywnie wysoką ocenę pracy.

c. Ocena ogólna

Doktorant bardzo dobrze rozumie pojęcie oraz zakres procedur analizy obrazów zarówno w ujęciu ogólnym, jak i w kontekście. W szczególności potrafi:

- opisać ich cechy i własności,
- syntetyzować algorytmy pozwalające na głęboką analizę własności,
- przedstawić wyniki analizy,
oraz
- wybrać i omówić możliwe do zastosowania procedury.

Sposób sformułowania problemu badawczego, przedstawiony w pierwszej i drugiej części, świadczą o dojrzałości naukowej Autora. Analizowany w pracy problem jest bardzo dokładnie sprecyzowany. Mimo mojej krytycznej uwagi w niniejszej recenzji, jestem zdania, iż uzasadnienie użycia sieci neuronowych i/lub innych algorytmów analizy obrazów wraz z towarzyszącymi procedurami jest w pełni kompletne. Ponadto bardzo

imponującym jest fakt, iż w trakcie pracy nad doktoratem zostało opublikowane wiele dobrych prac naukowych w tym cztery z dziesięciu są samodzielnymi publikacjami Kandydata.

Warto również dodać, że – realizując pracę – Pan mgr inż. Jarosław Bernacki wykazał się solidnym warsztatem informatycznym polegającym na samodzielnym zaprogramowaniu głównych algorytmów. Takie umiejętności są niezmiernie istotne, gdyż potwierdzają, że jest On niezależnym naukowcem. Ponadto uważam, że wykonane przez Niego eksperymenty, których liczba jest znaczna, świadczą, że Kandydat ma szczególne predyspozycje do pracy badawczej. Potrafi dobrać odpowiednie wskaźniki oceny jakości modeli, zilustrować wyniki na rysunkach, przedstawić ważne rezultaty w tabelach i wyciągnąć istotne wnioski. Dodany do pracy opis matematyczny powoduje, że recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska jest kompletna i w pełni wartościowa.

4. Podsumowanie

Recenzowana praca doktorska jest przykładem oryginalnego rozwiązania ciekawych zagadnień praktycznych. Do ich rozwiązania Autor rozprawy wykorzystał we właściwy sposób zaawansowane narzędzia technik informacyjnych jakimi niewątpliwie są sieci neuronowe i algorytmy działające na danych obrazowych. Świadczy to, o Jego dużej kompetencji w praktycznym posługiwaniu się narzędziami współczesnej informatyki. Niewątpliwie cennym jest umieszczenie obrazów w ogólnodostępnych repozytoriach, co daje możliwość na wykorzystanie ich zarówno w innych badanych zagadnieniach jak i pozwala na porównanie wydajności i efektywności innych procedur. Uzyskane w pracy wyniki uważam za niewątpliwie oryginalną (nowatorską) propozycję rozwiązania zagadnień technicznych, które zostały wielokrotnie zweryfikowane na drodze rzetelnie przeprowadzanych analiz walidacyjnych. Można zatem uznać, że recenzowana rozprawa doktorska ma charakter oryginalnej pracy projektowo-naukowej, o której mówi bieżąca Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Konkludując uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Jarosława Bernackiego zdecydowanie spełnia wymagania stawiane w odpowiednich przepisach rozprawom doktorskim i wobec tego stawiam wniosek o jej dopuszczenie do dalszych, przewidzianych Ustawą, etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Ponadto, biorąc pod uwagę aktualność tematyki badawczej, jej znaczny zakres, wysoką jakość prezentowanych wyników oraz ich istotny wkład w istniejący stan wiedzy i znaczącą – często samodzielną – aktywność naukową Kandydata, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

dr hab. inż. Piotr A. Kowalski, prof. AGH