

dr hab. inż. Piotr Napieralski, prof. uczelni
Instytut Informatyki I72
Wydział Fizyki Technicznej Informatyki
i Matematyki Stosowanej
Politechnika Łódzka

Łódź 11.07.2023

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

TYTUŁ ROZPRAWY:

Algorytmy identyfikacji sensorów obrazujących

AUTOR ROZPRAWY:

mgr inż. Jarosław Bernacki

PROMOTOR ROZPRAWY:

prof. dr hab. inż. Rafał Scherer

Formalną podstawą opracowania recenzji jest pismo z dnia 14.06.2023 r. Kierownika Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki prof. dr hab. inż. Roberta Nowickiego.

ZAKRES TEMATYCZNY I REALIZACJA ROZPRAWY

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów. Całość rozprawy została przedstawiona na 196 stronach. Rozprawa koncentruje się na problematyce identyfikacji sensorów obrazujących na podstawie analizy obrazów cyfrowych. Temat obejmuje techniki i metody służące do rozpoznawania aparatu rejestrującego, z wykorzystaniem cech charakterystycznych takich jak szum sensora, wady optyczne, nieliniowość obiektywu itp. Rozprawa skupia się również na zagadnieniach związanych z przetwarzaniem obrazów, uczeniem maszynowym i sieciami neuronowymi, które są wykorzystywane w procesie identyfikacji sensorów obrazujących.

Rozdział pierwszy pracy zawiera wprowadzenie, które w ogólny sposób definiuje zakres pojęciowy poszczególnych zagadnień związanych z badaniami wykonanymi przez Autora w ramach pracy.

W drugim rozdziale omówiono zbiór zdjęć IMAGINE, który został specjalnie opracowany w celu testowania algorytmów identyfikacji sensorów. Przedstawiono charakterystykę używanych urządzeń oraz omówiono dostępność tego zbioru na dedykowanej witrynie internetowej. Dodatkowo, opisano metody pobierania zdjęć z tego zbioru w celu zapewnienia czytelnikom pełnego zrozumienia procesu badawczego.

Rozdział trzeci stanowi kluczową część pracy, gdzie szczegółowo opisano algorytmy identyfikacji sensorów obrazujących. Przedstawiono zarówno znane z literatury metody, jak i nowe, autorskie propozycje. W tym rozdziale Autor omówił algorytmy takie jak MSE-DSI, CompaRe, Vignetting-CT oraz Distortion-CT. Ponadto, przeprowadzono

analizę identyfikacji sensorów przy użyciu konwolucyjnych sieci neuronowych, które są coraz bardziej popularnym narzędziem w dziedzinie przetwarzania obrazów. Daje to pełny przegląd różnych podejść i technik stosowanych w identyfikacji sensorów obrazujących.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki klasyfikacji różnych źródeł przez zaproponowane algorytmy w porównaniu do algorytmów znanych z literatury. Analiza dotyczyła zarówno skuteczności klasyfikacji, jak i porównania szybkości działania poszczególnych algorytmów. Wyniki opierają się na dużej liczbie reprezentatywnych zdjęć pochodzących z nowoczesnych urządzeń, co pozwoliło na wiarygodne wnioski i porównania.

W piątym rozdziale przeprowadzono szczegółową analizę statystyczną wyników uzyskanych przez Doktoranta. Za pomocą odpowiednich metod statystycznych potwierdzono skuteczność zaproponowanych algorytmów identyfikacji. Analiza dostarcza dodatkowych dowodów na użyteczność i efektywność opracowanych rozwiązań w porównaniu z innymi dostępnymi w literaturze.

W szóstym rozdziale skoncentrowano się na badaniu odporności algorytmu Lukása oraz konwolucyjnych sieci neuronowych na skuteczność identyfikacji sensorów obrazujących w obecności różnorodnych zewnętrznych szumów.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie całej pracy, gdzie autor podkreśla jej główne wnioski i rezultaty. Ponadto, wskazuje kierunki dalszych badań w dziedzinie identyfikacji sensorów obrazujących, sugerując obszary, które wymagają dalszych rozważań i doskonalenia. Praca stanowi cenny wkład w rozwój tej dziedziny i może być inspiracją dla przyszłych badań i projektów.

Rozprawa zawiera również spis rysunków, tabel, bibliografię oraz trzy dodatki. Pierwszy dodatek to „Algorytm Lukása - wartości współczynnika korelacji”, który przedstawia szczegółowe wyjaśnienie tego algorytmu wraz z obliczonymi wartościami współczynnika korelacji dla poszczególnych par sensorów. Drugi dodatek zawiera wybrane macierze konfuzji, które prezentują wyniki identyfikacji sensorów dla różnych algorytmów. Trzeci dodatek to „algorytm Lanczosa próbkowania obrazu”, który opisuje metodę próbkowania obrazów z uwzględnieniem właściwości winietowania.

Ważną częścią pracy jest opis i wykorzystanie zbioru zdjęć IMAGINE. Zbiór stanowi istotną podstawę do przeprowadzenia testów i analiz algorytmów identyfikacji sensorów obrazujących. Opracowany zbiór zdjęć ma kluczowe znaczenie dla badań, ponieważ dostarcza autentycznych obrazów ze zróżnicowanymi parametrami i cechami. Wykorzystanie takiego zbioru danych pozwala na rzetelne porównanie różnych algorytmów identyfikacji sensorów oraz analizę ich skuteczności i wydajności.

OMÓWIENIE TREŚCI I WYNIKÓW ROZPRAWY

Niniejsza praca miała na celu zaproponowanie metody identyfikacji sensorów obrazujących oraz przeprowadzenie wszechstronnego badania pozwalającego na zgłębienie, ocenę i rozwinięcie istniejących metod i algorytmów identyfikacji. Przedmiotem pracy było poszerzenie wiedzy na temat tej tematyki oraz opracowanie

nowych narzędzi i technik, które mogłyby przyczynić się do poprawy jakości i efektywności identyfikacji sensorów obrazujących.

W pierwszym etapie pracy, Autor dokładnie zbadał zbiór zdjęć IMAGINE, który stanowił podstawę analizy w kontekście identyfikacji sensorów. Autor nie tylko opisał charakterystykę zbioru, ale również zgłębił poznanie urządzeń generujących te zdjęcia. Przyjrzał się dokładnie wykorzystanym urządzeniom oraz zebranym danym, aby lepiej zrozumieć ich właściwości i ograniczenia.

W drugim etapie pracy, Autor skupił się na opracowaniu i analizie algorytmów identyfikacji sensorów obrazujących. Oprócz przedstawienia istniejących metod z literatury, Doktorant zaproponował nowe algorytmy, które miały na celu poprawę skuteczności identyfikacji. Szczegółowo omówił zarówno autorskie algorytmy identyfikacji, takie jak MSE-DSI, CompaRe, jak i algorytmy Vignetting-CT i Distortion-CT. Ponadto, Autor przeanalizował zastosowanie konwolucyjnych sieci neuronowych w identyfikacji sensorów obrazujących. Ten etap badań przyczynił się do poszerzenia wiedzy w dziedzinie identyfikacji sensorów i dostarczył nowych narzędzi oraz podejść, które mogą znaleźć zastosowanie w praktyce.

Przedstawione wyniki analizy klasyfikacji w rozdziale czwartym stanowią istotny element pracy. Autor dokładnie przeanalizował skuteczność i wydajność zaproponowanych algorytmów identyfikacji w porównaniu z istniejącymi rozwiązaniami. Wyniki oparte na reprezentatywnej liczbie zdjęć z nowoczesnych urządzeń stanowią wiarygodne dane do oceny skuteczności proponowanych rozwiązań. Dodatkowo, zaprezentowane zostały macierze konfuzji, które obrazują dokładne wyniki klasyfikacji, oraz porównane zostały czasy działania algorytmów. Pierwszym zbiorem zdjęć wykorzystanym w eksperymentach jest zbiór IMAGINE, który obejmuje 53 nowoczesne urządzenia. Każde z urządzeń zostało szczegółowo scharakteryzowane w rozdziale drugim. W skład tego zbioru wchodzi aparaty takie jak Acer Liquid Jade S, Apple iPhone 5S, Canon EOS 1D X Mark II, Canon EOS 5D Mark IV i wiele innych. Zdjęcia w tym zbiorze są kolorowe, w formacie JPEG, nie były modyfikowane przy użyciu zewnętrznego oprogramowania.

Drugim wykorzystanym zbiorem jest popularny zbiór Dresden Image Database, zawierający setki zdjęć z różnych typów aparatów, takich jak Agfa, Canon, Casio, Nikon, Olympus i wiele innych. Wszystkie aparaty w tym zbiorze posiadają sensory wykonane w technologii CCD. Z 48 aparatów wykorzystano 11 787 zdjęć do analizy.

W ramach tego rozdziału zaprezentowano wyniki klasyfikacji przy użyciu algorytmów MSE-DSI, CompaRe, Vignetting-CT, Distortion-CT, które zostały przetestowane w kontekście identyfikacji aparatów cyfrowych i skanerów płaskich. W przypadku algorytmu MSE-DSI, przeprowadzono testy klasyfikacji aparatów cyfrowych i skanerów płaskich, porównując wyniki z innymi algorytmami. Wyniki klasyfikacji algorytmu MSE-DSI były akceptowalne, osiągając poprawność klasyfikacji na poziomie 74,0% dla aparatów cyfrowych i 82,0% dla skanerów płaskich. Porównując wyniki z innymi algorytmami, algorytm Lukás osiągnął wyższą poprawność klasyfikacji dla aparatów cyfrowych, natomiast algorytm Khanna dla skanerów płaskich. Algorytm CompaRe został przetestowany w identyfikacji aparatów cyfrowych i porównany z innymi

algorytmami. Osiągnął poprawność klasyfikacji na poziomie 96,0%, podobnie jak algorytm Lukás. Algorytm Vignetting-CT został przetestowany w identyfikacji sensorów na zbiorach IMAGINE, Dresden Image Database i zbiorze smartfonów, porównując wyniki z algorytmem Lukás. Wyniki klasyfikacji były zadowalające, a algorytm Lukás osiągnął porównywalne wyniki bez wykorzystania technik uczenia głębokiego.

Algorytm Distortion-CT został opisany jako metoda analizy parametru dystorsji obiektywu k dla różnych obrazów przedstawiających ten sam kadr. Doktorant przeprowadził badania eksperymentalne, które wykazały zróżnicowanie wartości parametru k , nawet przy fotografowaniu identycznych scen. Interesujące jest również stwierdzenie, że nawet różne egzemplarze tego samego modelu aparatu mogą generować różne wartości parametru k . W rozdziale zaprezentowano wyniki analizy dla różnych urządzeń i zestawów zdjęć, co pozwala na identyfikację, czy dany zestaw został wykonany przez jeden czy więcej aparatów. Na podstawie wyników można przypuszczać że metoda cechuje się szybkością i możliwością obliczenia parametru k w czasie rzeczywistym. Jest to cenna informacja dla osób zajmujących się obróbką i analizą obrazów, umożliwiającą lepsze zrozumienie i porównanie fotografii z różnych źródeł.

Autor przeprowadził analizę szybkości działania poszczególnych algorytmów. Wyniki eksperymentów pokazały, że algorytm MSE-DSI wymaga znacznie krótszego czasu przetwarzania w porównaniu do innych algorytmów. Na przykład, obliczenie pojedynczej wartości MSE dla algorytmu MSE-DSI trwało około 2 sekund, podczas gdy algorytm Lukás potrzebował 2 minut, a metody oparte na sieciach konwolucyjnych wymagały nawet kilkudziesięciu godzin na naukę. Wyniki czasowe potwierdzają, że proponowany algorytm jest efektywny i szybki w przetwarzaniu obrazów. Algorytm CompaRe wykazał się przewagą pod względem szybkości przetwarzania obrazów w porównaniu do innych algorytmów. Generowanie cyfrowych odcisków palca za pomocą CompaRe było znacznie szybsze, a kompaktowa reprezentacja odcisków palca była korzystna dla sieci konwolucyjnych. Algorytm ten umożliwia skrócenie czasu uczenia sieci i redukcję rozmiarów plików cyfrowych odcisków palca, co może być praktyczne w różnych zastosowaniach, takich jak przechowywanie danych kryminalistycznych. Badania algorytmu Vignetting-CT, pozwoliły stwierdzić że przetwarza obrazy znacznie szybciej niż algorytm Lukás. Czas przetwarzania jednego obrazu wynosił średnio 0,03 minut dla Vignetting-CT i około 2 minut dla Lukás. Całkowity czas przetwarzania blisko 14 000 obrazów wynosił około 6 godzin dla Vignetting-CT i około 383 godzin dla Lukás.

Eksperymenty przeprowadzone w rozdziale czwartym wykazały, że proponowane algorytmy, takie jak CompaRe, MSE-DSI, Vignetting-CT i Distortion-CT, oferują skuteczną identyfikację aparatów cyfrowych. Algorytm CompaRe wyróżnia się wysoką skutecznością identyfikacji oraz szybkością generowania odcisków palca. Algorytm MSE-DSI zapewnia zadowalającą jakość klasyfikacji przy zachowaniu szybkości działania. Algorytmy Vignetting-CT i Distortion-CT umożliwiają szybką identyfikację na podstawie wad optycznych obiektywu. Wszystkie proponowane algorytmy oferują krótsze czasy przetwarzania w porównaniu z algorytmami literaturowymi.

W rozdziale piątym, Doktorant przeprowadził szczegółową analizę statystyczną uzyskanych wyników. Wykorzystując odpowiednie metody statystyczne, Autor dokładnie ocenił skuteczność i wiarygodność proponowanych algorytmów identyfikacji. To głębsze spojrzenie na dane umożliwiło wyciągnięcie bardziej precyzyjnych wniosków i podkreśliło trafność proponowanych rozwiązań.

W rezultacie, recenzowana praca dostarcza znaczącego wkładu w dziedzinę identyfikacji sensorów obrazujących. Autor nie tylko opracował nowe algorytmy i metody, ale również dokładnie przeanalizował ich działanie i uzyskane wyniki. Praca otwiera nowe możliwości w dziedzinie identyfikacji sensorów i wskazuje na potencjalne kierunki dalszych badań. Dzięki temu, naukowcy i praktycy będą mieli lepsze narzędzia do identyfikacji sensorów obrazujących, co przyczyni się do doskonalenia technologii w różnych dziedzinach.

UWAGI POZYTYWNE

Autor dokonał wkładu badawczego, zgłębiając zarówno teoretyczne aspekty identyfikacji sensorów obrazujących, jak i praktyczne aspekty związane z analizą zbioru zdjęć IMAGINE. Praca stanowi wartościowy zasób dla społeczności naukowej i inżynierskiej w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Autor nie tylko przedstawił istniejące algorytmy identyfikacji, ale również samodzielnie zaproponował nowe podejścia i metody. To wykazuje kreatywność i innowacyjność Doktoranta w dziedzinie identyfikacji sensorów obrazujących. Jego autorskie algorytmy, takie jak MSE-DSI i CompaRe, stanowią wartościowe dodatki do istniejących metod.

Docenić należy dokładną i kompleksową analizę wyników uzyskanych z zastosowania różnych algorytmów identyfikacji. Autor przeprowadził liczne testy i porównania, uwzględniając różnorodne kryteria oceny. To pozwoliło na rzetelne oszacowanie skuteczności i wydajności proponowanych rozwiązań.

Doktorant zadbał o podstawy metodologiczne swojej pracy. Dokładny opis zbioru danych, precyzyjne zdefiniowanie celu badawczego i zastosowanie odpowiednich narzędzi i technik analizy są dowodem na staranność i profesjonalizm w podejściu do podjętego tematu.

Praca ma potencjał do znalezienia praktycznego zastosowania w różnych dziedzinach, takich jak rozpoznawanie obrazów, robotyka czy przetwarzanie obrazów medycznych. Algorytmy i metody zaproponowane przez Autora mogą przyczynić się do poprawy skuteczności i precyzji identyfikacji sensorów obrazujących, co ma znaczenie dla rozwoju nowych technologii.

Praca kończy się konkretnymi wnioskami i wskazaniem kierunków dalszych prac badawczych. Autor wskazał na obszary, które wymagają dalszej eksploracji i udoskonalenia. To otwiera perspektywy dla innych badaczy, którzy mogą kontynuować prace na bazie wyników i wniosków zawartych w tej pracy.

Sformułowana wyżej pozytywna ocena przedstawionej do recenzji rozprawy, nie oznacza jednak, że zdaniem recenzenta, Autor nie ustrzegł się pewnych niedogodności dotyczących zagadnień merytorycznych, kwestii organizacji prezentacji treści pracy, a także drobnych błędów językowych czy typograficznych. Zostaną one wyszczególnione w formie uwag, sugestii i pytań do Autora w kolejnym podpunkcie niniejszej recenzji.

UWAGI DYSKUSYJNE I KRYTYCZNE

W niniejszym podpunkcie sformułowane zostaną uwagi dyskusyjne, krytyczne, sugestie oraz pytania recenzenta do Autora przedstawionej rozprawy. Są one wyszczególnione niżej.

UWAGI MERYTORYCZNE

1. Mimo że został postawiony cel, w pracy brakuje jasno zdefiniowanej tezy badawczej, która stanowiłaby centralny punkt analizy i argumentacji.
2. W rozdziale drugim opisano zbiór zdjęć IMAGINE, ale brakuje szczegółowych informacji na temat procesu zbierania tych danych. Nie zostało jasno opisane, jakie kryteria zostały zastosowane przy selekcji zdjęć ani jakie czynniki wpływały na wybór konkretnych urządzeń obrazujących. Przez brak tych informacji trudno ocenić reprezentatywność i wiarygodność zbioru danych.
3. Czy liczba zdjęć użyta w eksperymentach jest wystarczająca, aby wnioskować o skuteczności algorytmów dla całej populacji aparatów cyfrowych? Istnieje możliwość, że większa próbka zdjęć mogłaby dostarczyć bardziej reprezentatywnych wyników.
4. W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki klasyfikacji przy użyciu proponowanych algorytmów, ale ilość danych testowych wydaje się być stosunkowo ograniczona. W celu bardziej wiarygodnej oceny skuteczności i ogólnej wydajności algorytmów, może rozszerzenie zbioru danych testowych o większą liczbę przykładów reprezentujących różne scenariusze i warunki. Czy zastosowane algorytmy są wrażliwe na specyficzne parametry, takie jak oświetlenie, perspektywa czy rozdzielczość zdjęcia? Warto zbadać, czy algorytmy są stabilne i skuteczne w różnych warunkach i dla różnych rodzajów aparatów.
5. W sekcji dyskusji Autor skupia się głównie na porównaniu wyników wewnętrznych różnych algorytmów identyfikacji. Brakuje jednak porównania z wynikami innych badań lub walidacji zewnętrznej przy użyciu niezależnych zbiorów danych. Takie porównanie i walidacja mogłyby dostarczyć większej pewności co do skuteczności proponowanych rozwiązań.
6. W sekcji wniosków warto uwzględnić potencjalne ograniczenia metodyczne zastosowanej analizy. Na przykład, niektóre algorytmy identyfikacji mogą być wrażliwe na specyficzne warunki oświetleniowe lub inne czynniki, których nie uwzględniono w badaniu. Wskazanie tych potencjalnych ograniczeń i ich wpływu na wyniki pomogłoby czytelnikom lepiej zrozumieć kontekst i interpretować wyniki badań.

UWAGI TYPOGRAFICZNE I JĘZYKOWE

1. W tekście zauważalne są pewne błędy interpunkcyjne, takie jak braki przecinków lub ich nieprawidłowe użycie. Ponadto, średnik jest stosowany zamiennie z przecinkiem, co sugeruje brak konsekwencji w tym zakresie. Choć rozumiem, że użycie separatora dziesiętnego mogło wymagać pewnej elastyczności, powinniśmy jednak przestrzegać ustalonej konwencji interpunkcyjnej w pozostałych częściach manuskryptu.
2. W kilku miejscach w tekście pracy znajdują się spacje przed przecinkami i dwukropkami (strony: 42, 48, 52, 62, 117, 125, 188).
3. W pracy można spotkać pewne niezręczności stylistyczne, jak choćby powtórzenie na 20 stronie: „Ograniczeniem zbioru jest ograniczenie się jedynie do urządzeń mobilnych (...)”.

PODSUMOWANIE

Rozprawa stanowi cenny wkład Autora w poszerzenie wiedzy dotyczącej dziedziny identyfikacji sensorów obrazujących, co jest wynikiem oryginalnym. Wymienione przez Autora rozprawy, fakty publikacji części jej wyników w renomowanych czasopismach i ich prezentacja na konferencjach naukowych oznacza, że wyniki te zostały dodatkowo pozytywnie zweryfikowane przez środowisko naukowe. Uwzględniając zarówno uwagi pozytywne jak i te dyskusyjne i krytyczne oraz biorąc pod uwagę treść niniejszej recenzji, stwierdzam, że recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Wykazuje ona także ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w przedmiotowej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Bernackiego pod tytułem „Algorytmy identyfikacji sensorów obrazujących”, spełnia wymogi formalne.

Wnoszę o dopuszczenie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.