

# 1 Dane recenzenta

dr hab. Norbert Jankowski, prof. UMK  
Katedra Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń

## 2 Recenzja rozprawy doktorskiej „Algorytmy identyfikacji sensorów obrazujących” mgra Jarosława Bernackiego

Pan mgr Jarosław Bernacki w swojej rozprawie doktorskiej i publikacjach z nią związanych zajmował się tworzeniem algorytmów, które służą do rozpoznawania typu aparatu fotograficznego lub do rozpoznania konkretnego aparatu fotograficznego na podstawie zdjęć. Autor w tym celu stworzył algorytmy oparte na statystyce, a także na sztucznych sieciach neuronowych. Zadaniem tworzonych algorytmów było nauczenie się specyfiki urządzeń bądź urządzenia. Takie algorytmy mogą mieć zastosowanie m. in. w kryminalistyce. Źródłem takiej specyfiki są matryce aparatów lub zniekształcenia obrazów wynikające z własności obiektywów (niedoskonałości obiektywów).

Należy nadmienić, że postawiony w rozprawie problem jest wysoce nietrywialny. Mianowicie, gdy mamy do czynienia ze zwykłym rozpoznawaniem elementów zdjęć jak samochód, rower czy zwierzę, to tworząc algorytmy AI staraliśmy się osiągnąć możliwości człowieka. Tutaj mamy do czynienia z rozpoznawaniem, w którym nawet ludzie zajmujący się fotografią mają znikome szanse na rozpoznanie, jakim urządzeniem zostało wykonane zdjęcie.

Pierwsza część rozprawy jest poświęcona zdefiniowaniu zadań badawczych i prezentacji bieżącego stanu wiedzy w tematyce rozprawy. Szczegółowo omówione zostały typy szumów matryc, które występują w aparatach fotograficznych. Omówione zostały również typy zniekształceń wynikających z niedoskonałości obiektywów aparatów fotograficznych.

Przedstawione i omówione zostały znane z literatury podejścia do problemów rozpoznawania urządzenia na podstawie zdjęć z aparatów.

Pierwszy rozdział właściwy rozprawy poświęcony został omówieniu opracowania zbioru danych, który posłuży do testowania zaproponowanych przez autora algorytmów. Opracowany zbiór obrazów jest wręcz niezbędny ponieważ istniejące do tej pory zbiory danych nie dawały możliwości właściwego zbadania proponowanych algorytmów. W zaproponowanym zbiorze można znaleźć obrazy zebrane z wielu typów aparatów fotograficznych, o różnych wielkościach CMOS i różnych rozdzielczościach.

Jednym z głównych celów rozprawy było stworzenie algorytmów, którego proces uczenia przebiegałby znacząco szybciej. Dlatego też autor rozprawy zaproponował algorytm MSE-DSI, który wyznacza MSE z szumu części obrazu ( $512 \times 512$ ). Wyznaczanie MSE-DSI wykorzystuje tylko jeden z kanałów RGB. Takie podejście radykalnie zmniejsza liczbę obliczeń w trakcie wyznaczania wartości MSE-DSI dla wszystkich urządzeń, ale także w trakcie klasyfikacji, ponieważ sama klasyfikacja nie porównuje macierzy lecz tylko skalary, a ściślej mówiąc używany jest klasyfikator kNN do wyboru urządzenia. Takie obliczeniowe uproszczenie, jak zauważa autor, doprowadziło jednak do częściowej utraty jakości klasyfikacji. Jednak takie postępowanie może też stanowić wstępny etap klasyfikacji, po którym w wyniku zawężenia docelowych klas można dokonać dokładniejszej i szybszej klasyfikacji np. algorytmem Lukas. W tabeli 3.1 można zobaczyć jak różne potrafią być wartości MSE-DSI. Ciekawe, jakie standardowe odchylenia odpowiadają wartościom MSE-DIS dla poszczególnych urządzeń. Jak można przeczytać w jednym z artykułów poświęconych algorytmowi MSE-DSI przyspieszenie generowania odcisków palca jest około 10-krotne.

Kolejny algorytm zaproponowany przez pana Jarosława Bernackiego to CompaRe. Ten algorytm też wykorzystuje uproszczenie polegające na transformacji zdjęć do znacznie mniejszych macierzy (ale już nie skalarów). Zastosowano podzielenie obrazu na szereg podmacierzy i następnie zastąpienie podmacierzy ich własnym śladem. Wręcz zadziwiające jest, że stosowano to do oryginalnych zdjęć, a nie — jak przedtem — do szumu zdjęcia, czyli  $I - F(I)$ . Tak uzyskane macierze dla danego urządzenia są uśredniane i to już stanowi odcisk palca w tej metodzie. Ta metoda, podobnie jak poprzednia, znacząco przyspiesza proces klasyfikacji.

Najważniejsze jednak, że jakość metody CompaRe okazała się bardzo dobra ponieważ jakość klasyfikacji wzrosła do najlepszych wyników innych algorytmów. Jednocześnie dużemu przyśpieszeniu uległ proces klasyfikacji, co wynika w dużej mierze z bardzo dużego zmniejszenia wielkości "odcisków palca". Warto tu przytoczyć, że wszystkie odciski palców zgromadzone w analizie do algorytmu Lukas zajęły 1.2 tera bajtów, a odciski dla CompaRe 65 giga bajtów.

Analiza przeróżnych porównawczych wyników z kolejnego rozdziału, jak i dodatku pokazuje, że spośród metod o kompaktowej reprezentacji metoda CompaRe działa znacząco lepiej. Natomiast spośród wszystkich metod łącznie CompaRe działa najlepiej. To zdecydowanie bardzo ciekawe osiągnięcie—ciekawa gra *dziel i zwyciężaj* w kooperacji ze śladami podmacierzy.

Kolejna propozycja algorytmu opiera się na wadzie winietowania. Doktorant zaproponował więc policzenie średniej intensywności szumu w rogach obrazów. Szum liczony jest w 4 narożnych prostokątach, lecz redukcji szumu podlega tylko kanał czerwony.

Przez to, że narożne prostokąty są bardzo małe (testy na 5% szerokości i wysokości), to liczba analizowanych pikseli spada w opisywanym przykładzie 100-krotnie. Ma więc to ogromny wpływ na szybkość analizy obrazów. Testy na zbiorze "smartfony" pokazały, że gdy algorytm Lukas osiągnął 89% poprawności, to algorytm Vignetting-CT osiągnął 82%. Można powiedzieć, że spadek jest dość wyraźny, ale ilość obliczeń wielokrotnie mniejsza. Większy spadek jakości miał miejsce dla zbiorów IMAGINE i Dresden.

Wydaje mi się, że w kontekście winietowania można by jeszcze pokusić się o uzależnienie go od wybranej przesłony podczas robienia zdjęcia. Chodzi o fakt, iż przy przymkniętej przesłonie winietowanie może zanikać. Wówczas nie bardzo można mówić o jego wykrywaniu. Można by natomiast spróbować powiązać siłę spadku ostrości od środka zdjęcia z użytą przesłoną. Posiłkowanie się taką zależnością mogłoby wskazać, kiedy możemy mieć do czynienia z winietowaniem i w takich warunkach można by zwiększyć jakość klasyfikacji, tj. klasyfikacja byłaby podejmowana jeśli wykryto by, że można mieć do czynienia z winietowaniem. Jednak nie jestem pewien na ile może się to w praktyce powieść.

Kolejna propozycja to próba stworzenia modelu rozpoznającego na bazie dystorsji, czyli

geometrycznej wady obiektywów. Dystorsja to oczywiście problem–zmora konstruktorów obiektywów od dawna i dzisiaj. W wielu obiektywach może być mało zauważalna choć nie oznacza to, że jest zerowa. W wypadku tego algorytmu autor proponuje wyznaczenie parametru  $k$  dystorsji z wzoru Browna. W tym celu rozbił to na dwa etapy, czyli redukcję dystorsji i wyznaczenie parametru  $k$  w analizie obrazu. Pan Bernacki, w oparciu o przeprowadzone analizy, twierdzi, że proponowany algorytm bardziej niż do rozpoznawania modelu aparatu nadaje się do sprawdzania, czy grupa zdjęć została wykonana tym samym modelem aparatu (z takim samym obiektywem). Grupa zdjęć wykonanych tym samym urządzeniem charakteryzuje się bardzo zbliżonymi parametrami dystorsji  $k$ . Taki schemat rozpoznawania również może być przydatny w kryminalistyce.

Jeszcze jednym wątkiem badawczym była analiza struktur, procesu uczenia i doboru funkcji aktywacji w konwolucyjnych sieciach neuronowych do zagadnienia rozpoznawania modelu aparatu. Zauważono wyraźnie pozytywny wpływ zastąpienia funkcji RELU przez SELU lub Leaky RELU. W efekcie tej zmiany proces uczenia jest szybszy. Jednakże jakość klasyfikacji pozostała zbliżona do algorytmu CompaRe.

W rozdziale 5 wnikliwej statystycznej analizie zostały poddane proponowane algorytmy i ich rezultaty na wybranych zbiorach. Przeprowadzono szereg testów statystycznych celem zbadania statystycznej istotności różnic pomiędzy wynikami algorytmów na wybranych zbiorach. Zasadniczo główne obserwacje opisane powyżej się potwierdziły. Jak na przykład wyższość algorytmu CompaRe nad algorytmami Valsesia i Li. Pokazano także wyższość algorytmu CompaRe nad algorytmami Lukas, Bondi, Tuama, Mandelli oraz Kirchner & Johnson.

Analizie poddano także odporność algorytmów rozpoznawania na wybrane deformacje obrazów. Analizowano m.in. szum pieprz i sól czy rozmycie Gaussowskie. Zauważono, że rozmycie może zdecydowanie nie wystarczyć, aby zaburzyć proces rozpoznawania. Doktorant zbadął, że dodawanie szumu Poissona także nie wpływa znacznie na klasyfikację algorytmami Lukas i CNN. Ciekawe dlaczego nie zbadano odporności identyfikacji algorytmu CompaRe.

Dodatkowym osiągnięciem jest stworzenie algorytmu przeciwdziałającego wykryciu aparatu, które polega na przycięciu małego marginesu oryginalnego zdjęcia, a następnie powiększeniu go

do pierwotnych rozmiarów z wykorzystaniem algorytmu Lanczosa. Metodę tę testowano na algorytmie Lukasa.

### 3 Podsumowanie

Autor doktoratu wykazał się szeroką wiedzą z zakresu sieci neuronowych, metod statystyki i uczenia maszynowego. Wszystko to omówione zostało szczegółowiej w powyższej części recenzji.

Za oryginalne osiągnięcie naukowe w dyscyplinie informatyka techniczna należy uznać zaproponowane przez autora algorytmy i stworzony zbiór danych. Na szczególną uwagę zasługuje algorytm CompaRe, który jest bardzo dokładny i bardzo szybki. Całość badań naukowych została starannie zweryfikowana szeregiem testów i wiarygodnych opracowań statystycznych.

Na uwagę zasługuje starannie dobrana i bogata bibliografia. Praca charakteryzuje się też dużą poprawnością naukowo–techniczną.

Warto też wspomnieć, że Pan Bernacki jest autorem 9 publikacji związanych z doktoratem, z czego wszystkie są na tzw. liście ministerialnej punktowanych publikacji.

**Kończąc, oceniam pozytywnie dorobek doktoranta.**

Uważam, że zaprezentowana rozprawa spełnia warunki dotyczące prac doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Toruń, 6.07.2023

Norbert Jankowski