

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab

która odbędzie się w dniu **25 marca 2024 roku**, o godzinie **10:00** w trybie hybrydowym

Temat rozprawy:

„Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek na podstawie obrazowania tomograficznego”

Promotor: prof. dr hab. inż. Tomasz Markiewicz, prof. uczelni – Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrowolski – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

dr hab. inż. Michał Kruk – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

prof. dr hab. inż. Michał Strzelecki – Politechnika Łódzka

Obrona odbędzie się w Gmachu Starej Kotłowni, sala nr 4 oraz zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie w formie zdalnej proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa na adres sekretarza komisji: dr hab. inż. Michał Śmiałek, email: michal.smialek@pw.edu.pl, do dnia 22 marca 2024, godz. 15:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Aleksandra-Osowska-Kurczab>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni

Streszczenie

Tytuł: *Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek na podstawie obrazowania tomograficznego*

Guzy nerek to szósta wśród najczęściej występujących odmian chorób nowotworowych. Pomimo rozwoju opieki medycznej nadal charakteryzuje się niezadowalającymi metodami terapii. Szczególnie istotnym problemem jest wieloetapowa diagnostyka, która utrudnia szybkie podjęcie specjalizowanego leczenia. W pracy opracowano system automatycznej analizy obrazowania medycznego, który mógłby wspomagać proces diagnostyki 7 typów zmian chorobowych nerek, w tym czterech podtypów złośliwych, 2 łagodnych oraz torbieli (patologii nienowotworowej). Przeanalizowano możliwość różnicowania typów zmian na podstawie wyników pierwszego etapu diagnostycznego, którym jest badanie tomografii komputerowej, służące lekarzom specjalistom jedynie jako narzędzie lokalizacyjne guzów. Na potrzebę przeprowadzonych eksperymentów, zebrany został zbiór 254 wyników badań tomografii komputerowej z kontrastem. Dotyczył pacjentów ze zweryfikowaną patologią nerki przez badanie histopatologiczne. Zbiór danych jest wynikiem współpracy ze szpitalem Wojskowego Instytutu Medycznego w ramach grantu NCN OPUS12 nr 2016/23/B/ST6/00621.

W pracy przeanalizowano szeroki wachlarz zagadnień związanych z analizą obrazowania medycznego – od metod przetwarzania obrazów, technik opisu wzorców, przez metody ich klasyfikacji oraz wiarygodnej ewaluacji wyników. Porównano ze sobą klasyczną architekturę systemu klasyfikacji wzorców z wykorzystaniem analizy teksturalnej oraz różne metody tworzenia trenowalnych reprezentacji z wykorzystaniem sieci głębokich. Aby dodatkowo poprawić skuteczność systemu, autorka pracy zaprojektowała system zespołowej klasyfikacji, który pozwolił na osiągnięcie wyników na poziomie $69.86 \pm 6.62\%$ średniej miary F1 w zadaniu klasyfikacji siedmioklasowej. Uzyskiwane wyniki wyraźnie przewyższają te raportowane w dostępnych artykułach naukowych, pomimo rozszerzenia zadania o dodatkowe klasy. Wyniki pracy, dzięki zaproponowanemu protokołowi ewaluacji ilościowej i jakościowej, mogą być transferowalne nie tylko do innych zagadnień analizy obrazowania radiologicznego zmian nowotworowych, ale również do wszelkich zagadnień charakteryzujących się niskim kontrastem, małym rozmiarem oraz dużą różnorodnością wzorców obrazowych.

Słowa kluczowe: *uczenie maszynowe, głębokie uczenie, analiza teksturalna, nowotwory nerek, klasyfikacja obrazów medycznych, tomografia komputerowa*

Abstract

Title: *Machine learning methods in renal tumour detection based on computed tomography imaging*

Neoplastic diseases such as renal carcinomas pose a significant challenge for the healthcare system due to their increasing prevalence and deficient treatment methods. The most considerable bottleneck is the current diagnosis procedure, which consists of 2 independent medical examinations. It results in patients waiting, even though the earlier the treatment, the better the results.

This thesis proposed a solution for automated diagnosis of the seven most popular renal tumour subtypes (four malignant, two benign, and a cyst) based purely on computed tomography scans. In diagnostic practice, medical imaging is usually used only for localisation purposes, as the manual type classification is error-prone and not sensitive enough to minor details hidden in the scans. The study was conducted on a dataset comprising 254 single-phase contrast-enhanced computed tomography scans of patients with neoplastic diseases. The scans, annotations, and histopathologically confirmed diagnoses were gathered in cooperation with the Military Institute of Medicine (funding: NCN grant OPUS12 2016/23/B/ST6/00621). The thesis explores a wide range of topics, covering each step of the diagnosis system, from data curation, processing, and transformation through methods of automated feature generation, pattern classification, and reliable evaluation. Two primary representation methods were compared: classic, based on texture analysis, and contemporary, utilising recent advancements in deep learning. Thanks to the proposed ensembling strategy, results reached $69.86 \pm 6.62\%$ of the mean F1 score, significantly surpassing the current state-of-the-art in renal tumour diagnosis.

Results of the work can find applications not only in the analysis of radiological imaging but also in any computer vision tasks characterised by low contrast, small size, and non-separable image patterns. Presented computer-aided diagnosis systems can assist medical specialists in prioritising emergency cases that need immediate treatment and contribute to large-scale screening tests.

Keywords: *machine learning, deep learning, texture analysis, renal tumours, medical image classification, computed tomography*

Prof. dr hab. inż. Andrzej P. Dobrowolski
Wojskowa Akademia Techniczna
andrzej.dobrowolski@wat.edu.pl, tel. 601 382 822

Warszawa, 22.01.2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab, zatytułowanej:

***Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek
na podstawie obrazowania tomograficznego***

*Recenzja została sporządzona z inicjatywy Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej Pana dr. hab. inż.
Jarosława Arabasa.*

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Problem skutecznej analizy obrazowej w kontekście diagnostyki nowotworów nerek jest niezmiernie istotny i aktualny zarówno z naukowego, jak i z praktycznego punktu widzenia, gdyż umożliwia częściową automatyzację interpretacji wyników, co z kolei poprawia komfort pacjenta, zmniejszenie kosztów świadczeń medycznych oraz przede wszystkim przyspieszenie pierwszej decyzji o leczeniu.

Zaproponowany przez Kandydatkę do stopnia doktora system wspierający diagnostykę nowotworów nerek, jako dane wejściowe traktuje pojedyncze obrazy tomograficzne zarejestrowane z podaniem kontrastu (CECT – Contrast-Enhanced Computed Tomography). Analizowane algorytmy mają za zadanie automatyzację procesu identyfikacji 7 typów zmian, w tym 2 typów nowotworów łagodnych, 4 złośliwych oraz torbieli. Jest to zadanie dość trudne, ze względu na mnogość kształtów i tekstur oraz często małą swoistość. Dlatego nawet doświadczeni onkolodzy w oparciu o dane obrazowe stawiają tylko wstępne diagnozy, a ostateczna decyzja podejmowana jest z reguły na podstawie badania histopatologicznego. Z tego powodu od wielu lat, w kraju i za granicą, w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są prace badawcze nad udoskonalaniem istniejących metod diagnostyki obrazowej nowotworów, w szczególności nowotworów nerki. W tym kontekście wybór tematyki rozprawy uważam za właściwy i odpowiadający wymaganiom aktualności tematyki badawczej.

Światowe osiągnięcia nauki w przedmiotowym zakresie są bardzo trudne do bezpośrednich porównań ponieważ większość autorów nie przedstawia dokładnych opisów ewaluacji proponowanych rozwiązań, w szczególności: sposobów balansowania zbiorów, wyboru zbiorów uczącego, walidującego i testującego, źródła prawdziwej etykiety czy procedury doboru hiperparametrów algorytmów.

W recenzowanej pracy bardzo dobrze udokumentowano historię rozwoju systemu oraz procedury jego ewaluacji, a Kandydatka przeprowadziła serię eksperymentów, które miały za zadanie udowodnienie 3 głównych tez rozprawy:

1. *Możliwe jest stworzenie zautomatyzowanej metody pozwalającej na różnicowanie 7 typów guzów nerek z wysoką dokładnością jedynie na podstawie obrazowania CT z kontrastem. Pojedyncza faza tego badania jest wystarczającym źródłem informacji do stworzenia systemu opisu i klasyfikacji guzów nerek.*
2. *Połączenie różnych metod reprezentacji obrazów radiologicznych pozwala na poprawę dokładności klasyfikacji. W szczególności, połączenie metod neuronowej reprezentacji z operatorami teksturalnymi pozwala na uzyskanie wyników na poziomie aktualnego stanu wiedzy ale przy znacznie większej liczbie reprezentowanych klas.*
3. *Metody przetwarzania obrazów, takie jak np. zmiana rozdzielczości, normalizacja czy ekstrakcja ROI mają znaczący wpływ na zdolności generalizacyjne systemów predykcyjnych w zadaniu analizy obrazowania medycznego.*

Rozprawa ma charakter eksperymentalny z wyraźnym rysem aplikacyjnym o dużym znaczeniu praktycznym, a podjęty w niej problem badawczy, jest z naukowego punktu widzenia aktualny zarówno w aspekcie inżynierskim (metody przetwarzania obrazów, metody klasyfikacji wzorców), jak i medycznym (nowoczesne metody diagnostyczne).

2. Wkład Kandydatki

Rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów ponumerowanych łącznie ze Wstępem (1) i Podsumowaniem (7). Pierwsze dwa rozdziały prezentują problem badawczy i aktualny stan wiedzy w jego obszarze, powiązany z przeglądem literatury. Sformułowano tu również cel i tezy pracy. W rozdziałach trzecim i czwartym Kandydatka przedstawia tematykę przetwarzania obrazów oraz ich klasyfikacji z uwzględnieniem specyfiki obrazów tomograficznych nowotworów nerek zarejestrowanych z podaniem kontrastu. Są to rozdziały w zasadzie odtwórcze, porządkujące jednak zagadnienia pod kątem ich sprawnego wykorzystania w rozdziale piątym, który poświęcony jest modelom uczenia maszynowego zastosowanym w pracy. W rozdziale szóstym Kandydatka prezentuje wyniki eksperymentalne z wykorzystaniem modeli zdefiniowanych w rozdziale piątym. Podsumowując pracę, Kandydatka komentuje otrzymane wyniki, potwierdzające wszystkie tezy pracy, przedstawia swoje główne osiągnięcia oraz przewiduje dalsze kierunki badań w dziedzinie.

Określając ramy projektowanego systemu diagnostycznego Kandydatka przyjęła, że danymi wejściowymi systemu diagnostycznego są obrazy jednej fazy CECT z wstępnie wykonaną segmentacją guza. Dodatkowo przyjęła, że każdy przekrój guza niesie informację wystarczającą do postawienia poprawnej diagnozy, a kolejne przekroje mają równoważny wpływ na ostateczną diagnozę.

Do najważniejszych, przedstawionych w rozprawie, osiągnięć Kandydatki można zaliczyć:

- Przygotowanie zbioru obrazów CECT do klasyfikacji.
- Analizę eksploracyjną zbioru danych, obejmującą preselekcję obrazów ze względu na ich jakość i jej wpływ na cechy dystynktywne.
- Opracowanie automatycznego systemu przetwarzania danych obrazowych z możliwością parametryzacji procesów selekcji przekrojów, normalizacji, zmiany rozdzielczości, ekstrakcji regionów nowotworowych oraz budowy zbiorów trenujących i testujących.
- Implementację 18 metod generacji cech diagnostycznych, w tym dwóch – wykorzystujących cechy pozycyjne i sekwencyjne – w pełni autorskich Kandydatki.
- Implementację 28 metod klasyfikacji wzorców.
- Opracowanie metod selekcji składników zespołu klasyfikatorów oraz agregacji ich wskazań.
- Opracowanie wiarygodnej metody ewaluacji systemów analizujących zobrazowania medyczne.
- Interpretację wyników analizy ilościowej wyjaśniającej uzyskiwane poziomy dokładności systemu i wskazującą na wyzwania występujące w zadaniu różnicowania nowotworów nerek.

Udokumentowane w rozprawie rezultaty są w dużym stopniu uniwersalne i mogą znaleźć zastosowanie również w analizie innych obrazów – nie tylko z obszaru medycyny.

3. Poprawność

Postawione w rozprawie doktorskiej tezy zostały udowodnione poprzez prawidłowo zaplanowane badania eksperymentalne opisane w rozdziałach piątym i szóstym. Olbrzymia masa doświadczeń – z których, siłą rzeczy, tylko część Kandydatka zaprezentowała w rozprawie – pozwoliła na wybór optymalnych dla rozważanego zagadnienia sposobów modelowania oraz dobór i optymalizację algorytmów pomocniczych poprawiających skuteczność zaprojektowanego i zaimplementowanego systemu diagnostycznego. Eksperymenty przedstawione w rozprawie są bardzo dobrze opisane, a uzyskiwane sukcesywnie wyniki prawidłowo interpretowane i wykorzystywane w kolejnych etapach.

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab została napisana w sposób przejrzysty, z poprawną kolejnością omawiania zagadnień i wyników. W rozprawie nie znalazłem istotnych błędów merytorycznych, chociaż występują pewne drobne nieścisłości czy brak konsekwencji, np.:

- Na str. 16 Kandydatka stwierdza, że „Uczenie głębokie jest aktualnym stanem wiedzy” – co to znaczy?
- Rys. 2.2 ilustruje definicje gęstości próbkowania oraz rozdzielczości, ale same definicje nie są nigdzie przytoczone.
- Na rys. 2.3 powinny być raczej zilustrowane te same przypadki opisane trzema różnymi skalami – z tego rysunku trudno cokolwiek wywnioskować o różnicach między skalami. Ponadto, odnośny akapit i zmodyfikowany rysunek powinny być przedstawione po opisie skal.
- Na początku rozdziału 3.2.1 Kandydatka napisała, że x oznacza współrzędne ciągłe, ale już dwa zdania dalej jest zapis, że współrzędne x są punktami (dyskretnymi).
- Na rys. 3.5 dwa obrazy w prawym górnym rogu są identyczne.

Recenzowana rozprawa została przygotowana z wysoką starannością i dbałością o poziom edytorski, tym nie mniej Kandydatka nie ustrzegła się kilku drobnych błędów edycyjnych i językowych. Przykładowo:

- Str. 40: zamiast „... na większą ...”, powinno być „większą”.
- Str. 64.: „Dyskretyzacja sygnału analogowego jest sparametryzowane za pomocą okresu próbkowania Δ i opisuje się następującą relacją”.
- Str. 76, powinno być „liczbę zakodowaną”.
- Str. 76, zamiast „długość sygnału sinusoidalnego”, powinno być „długość fali, długość jednego okresu”.
- Str. 96, zamiast „ociąga”, powinno być „pociąga”.
- Str. 116, zamiast „usuwanych”, powinno być „usuwany”.
- Str. 116, zamiast „Pełna procedura”, powinno być „Pełną procedurę”.
- Str. 116, zamiast „ich efekt”, powinno być „ich wpływ”.

Szczególnie uciążliwy podczas lektury jest brak numeracji wzorów, który utrudnia dyskusję rozprawy. W publikacjach naukowych numerowanie wzorów jest niekwestionowanym standardem.

Uważam, że większości z wymienionych usterek Kandydatka mogłaby uniknąć, gdyby praca nie była tak obszerna (214 stron plus *Dodatek*) i obejmowała tylko kwestie istotne dla udowodnienia tezy rozprawy, pomijając ogólnie znane opisy metod i algorytmów. Przytoczone usterki nie obniżają jednak w żadnym stopniu mojej wysokiej oceny wartości merytorycznej rozprawy.

4. Wiedza Kandydatki

W rozdziale pierwszym Kandydatka dokonuje przeglądu literatury i prezentuje istniejący stan wiedzy w obszarze rozprawy wpisującym się w dyscyplinę naukową *Informatyka Techniczna i Telekomunikacja*. Poza zarysem ogólnym Kandydatka prezentuje zagadnienia szczegółowe związane z uczeniem maszynowym i specyfiką nowotworów nerek. W mojej opinii opis jest profesjonalny i świadczy o dużej biegłości Kandydatki w tym obszarze oraz głębokim zrozumieniu prezentowanych zagadnień.

Krajowa i zagraniczna literatura naukowa dotycząca zagadnień przetwarzania obrazów medycznych, a w szczególności tomograficznych jest bardzo rozległa, a ostatnio można zaobserwować rosnący trend liczby publikacji poświęconych tej tematyce. Kandydatka dokonała trafnej selekcji źródeł ograniczając się do 264 reprezentatywnych pozycji, z których wiele to pozycje z ostatnich kilku lat, co świadczy o Jej dobrej orientacji w omawianej problematyce. Cytowania dotyczą literatury polskiej i zagranicznej oraz, co warto podkreślić, prac własnych z istotnym udziałem Kandydatki (lata 2020 – 2023). Kandydatka formułuje poprawne wnioski z analizy źródeł wykazując zasadność realizacji celów wskazanych w rozprawie.

5. Inne uwagi

Za oryginalny dorobek Kandydatki uważam całość osiągnięć związanych z problematyką różnicowania nowotworów nerek na podstawie obrazów CECT. Wprawdzie Kandydatka zastosowała w większości klasyczne narzędzia badawcze i obliczeniowe uzupełniając je o kilka rozwiązań autorskich, ale dokonała ich umiejętnego połączenia w kompletny i poddany weryfikacji system. Wobec powyższego uważam, że wniosła konkretny i samodzielny wkład do dyscypliny naukowej *Informatyka Techniczna i Telekomunikacja* w zakresie przetwarzania obrazów i klasyfikacji wzorców.

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez artykuły 186 i 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (z późniejszymi zmianami), stwierdzam, że: Kandydatka posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie *Informatyka Techniczna i Telekomunikacja* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a jej rozprawa doktorska zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab pt. *Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek na podstawie obrazowania tomograficznego* spełnia wszystkie wymagania określone przez obowiązujące przepisy i dlatego wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto, ze względu na liczne walory pracy, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.



Andrzej Piotr Dobrowolski

Elektronicznie podpisany przez
Andrzej Piotr Dobrowolski
Data: 2024.01.22 18:13:50
+01'00'

Dr hab. inż. Michał Kruk, prof. SGGW
Instytut Informatyki Technicznej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 159
02-776 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab pt.: „Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek na podstawie obrazowania tomograficznego”, przygotowanej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Tomasza Markiewicza w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Recenzja została sporządzona w związku z powołaniem przez Radę Naukową Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej w osobie przewodniczącego rady - dra hab. inż. Jarosława Arabasa, prof. uczelni, zgodnie z Uchwałą nr 575/2023 z dnia 19.09.2023 roku, do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych pani mgr inż. Aleksandrze Osowskiej-Kurczab.

1. Trafność wyboru tematyki pracy doktorskiej

Praca mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab, zatytułowana „Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek na podstawie obrazowania tomograficznego”, przedstawia możliwość zastosowania metod sztucznej inteligencji do wspomagania diagnostyki medycznej nowotworów. Tematyka ma charakter interdyscyplinarny, gdyż łączy Informatykę Techniczną i Telekomunikację z Naukami Medycznymi. Połączenie takie ma prócz wartości naukowej również duże znaczenie społeczne, może w przyszłości znacząco przyspieszyć diagnostykę chorób nowotworowych i innych, wszędzie tam, gdzie brane jest pod uwagę obrazowanie TK. W mojej ocenie wybrany temat jest aktualny i istotny dla dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

2. Cel, teza i zakres pracy

Celem pracy było opracowanie systemu automatycznej analizy obrazowania medycznego, mającego wspomagać diagnostykę siedmiu typów zmian chorobowych nerek, w tym czterech podtypów nowotworów złośliwych, dwóch łagodnych oraz torbieli. System bazuje na analizie wyników badania tomografii komputerowej, służącego lekarzom jako narzędzie lokalizacyjne guzów. Wykorzystano zbiór 254 wyników badań tomografii komputerowej z kontrastem, pochodzących od pacjentów z potwierdzoną patologią nerki poprzez badanie histopatologiczne, zebranych w ramach współpracy z Wojskowym Instytutem Medycznym. Ważne jest, że cel

pracy, którym jest stworzenie systemu klasyfikacji o dokładności dorównującej najlepszym, przytaczanym w literaturze, lecz o większej liczbie klas, został postawiony jasno i prawidłowo, a jego weryfikacja może zostać przeprowadzona w sposób ścisły. Również zakres pracy jest prawidłowy i właściwy podjętemu problemowi naukowemu.

Praca ma charakter zarówno badawczy, jak i aplikacyjny. W jej ramach zaproponowany i przetestowany został zestaw danych oraz modeli klasyfikacji tak, aby założone cele zostały zrealizowane.

Autorka postawiła 3 tezy:

- Teza 1: Możliwe jest stworzenie zautomatyzowanej metody pozwalającej na różnicowanie 7 typów guzów nerek z wysoką dokładnością jedynie na podstawie obrazowania CT z kontrastem. Pojedyncza faza tego badania jest wystarczającym źródłem informacji do stworzenia systemu opisu i klasyfikacji guzów nerek.
- Teza 2: Połączenie różnych metod reprezentacji obrazów radiologicznych pozwala na poprawę dokładności klasyfikacji. W szczególności połączenie metod neuronowej reprezentacji z operatorami teksturalnymi pozwala na uzyskanie wyników na poziomie aktualnego stanu wiedzy (ang. SOTA), ale przy znacznie większej liczbie reprezentowanych klas.
- Teza 3: Metody przetwarzania obrazów, takie jak np. zmiana rozdzielczości, normalizacja czy ekstrakcja ROI mają znaczący wpływ na zdolności generalizacyjne systemów predykcyjnych w zadaniu analizy obrazowania medycznego.

W mojej opinii tezy zostały zdefiniowane prawidłowo w oparciu o dogłębną analizę obecnego stanu wiedzy.

3. Struktura pracy

Praca zawiera siedem rozdziałów oraz sześć dodatków, w sumie 240 stron. W moim przekonaniu podział dość obszernej pracy na część główną oraz dodatki jest jak najbardziej zasadny, ponieważ pozwala skupić się na głównej tematyce, a szczegóły doczytać oddzielnie.

W **rozdziale pierwszym** zawarto wstęp, przedstawiono problem badawczy wraz z przeglądem literatury i aktualnym stanem wiedzy. Uważam, że przegląd literatury stanowi mocną stronę pracy. Zawiera pozycje klasyczne (nawet z 1936 roku) oraz bardzo aktualne, prezentujące najnowsze osiągnięcia nauki. Ciekawe jest zestawienie tabelaryczne prezentujące najnowsze wyniki w opisywanym problemie badawczym. Na końcu znajdują się prawidłowo postawione cel i tezy pracy. W **rozdziale drugim** opisano aspekty medyczne diagnostyki nowotworów oraz opisano dostępne dane badawcze. Tu również należy zwrócić uwagę, że opis zbioru danych należy do mocnych stron pracy. Odpowiednie przygotowanie zbioru danych uczących i testujących ma decydujący wpływ na wartość modeli klasyfikacyjnych i stanowi podstawę rzetelnej weryfikacji osiągniętych celów badawczych. Autorka pokazuje w pracy, że bardzo dobrze zdaje sobie z tego sprawę, dlatego podeszła do tematu w sposób wnikliwy i obszerny. W **rozdziale trzecim** przedstawiono metody przetwarzania i analizy obrazów, a w **czwartym** opisano modele uczenia maszynowego w zadaniach rozpoznawania obrazów. Rozdziały te stanowią

głównie opis teoretyczny stosowanych metod. **Rozdział piąty** zawiera opis modeli analizy, które wykorzystane zostały w pracy, przedstawia architektury, algorytmy analizy wzorców oraz ich różnicowania. Ważną część pracy badawczej przedstawia **rozdział szósty**. Prezentuje on wyniki eksperymentów z użyciem wcześniej opisanych metod oraz ich dyskusję, a także na ich podstawie prezentuje wnioski. W omawianym rozdziale Autorka umiejętnie i przejrzysto prezentuje wyniki oraz na ich podstawie wyciąga właściwe wnioski. Świadczy to o dużej dojrzałości Doktorantki i przygotowaniu do dalszej pracy badawczej. Rozdział ten zaliczam również do mocnych stron pracy. **Rozdział siódmy** jest podsumowaniem wyników oraz przedstawieniem głównych osiągnięć oryginalnych. Zaprezentowano również prace możliwe do wykonania w najbliższej przyszłości. Do pracy dołączono sześciopunktowy **dodatek**, w którym zawarto rozszerzenie analizy wyników oraz uszczegółowiono opisy zawarte w rozdziale drugim i piątym.

4. Główne osiągnięcia naukowe pracy

Do najważniejszych osiągnięć oryginalnych Autorki zaliczyłbym:

- **Zebranie, przygotowanie i weryfikacja zbioru danych.** Jak już wspomniałem, odpowiednio przygotowany zbiór danych jest kluczowy do dalszej budowy modeli klasyfikacyjnych. Autorka stanęła przed niebanalnym zadaniem, gdyż pisząc pracę w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, musiała w sposób rzetelny przygotować i co ważne zweryfikować dane medyczne. Na przygotowanym zbiorze danych zrealizowano analizę eksploracyjną oraz zaproponowano serię transformacji surowych danych wejściowych celem poprawy generalizacji wzorców danych.
- **Stworzenie i przetestowanie nowych cech diagnostycznych** – Autorka zaproponowała i zaimplementowała autorski zestaw cech - pozycyjnych i sekwencyjnych.
- **Przygotowanie modeli i architektur klasyfikatorów.**
- **Przygotowanie i implementacja zespołu klasyfikatorów.** Autorka przygotowała modele klasyfikatorów, połączyła je w zespół, opracowała metody selekcji jego członków oraz zaproponowała trzy niezależne metody głosowania na podstawie indywidualnych wskazań.
- **Opracowanie wiarygodnej metody ewaluacji systemów analizujących obrazowanie medyczne oraz przeprowadzenie analizy jakościowej wyników** – Autorka zaproponowała analizę wydajności systemów, która zapobiega wymianie informacji pomiędzy zbiorami oraz minimalizuje tendencyjność wyników. Na koniec Doktorantka przeprowadziła dogłębną analizę jakościową i ilościową wyników.

5. Pytania i uwagi

- str. 63, Tabela 3.3 - brakuje wyjaśnienia części oznaczeń
- str. 64 – W pracy napisano: *W pracy rozważany jest jedynie przypadek zwiększania rozdzielczości obrazów w celu wzbogacenia informacji dostępnej w wejściowych obrazach.* – zastosowane w pracy metody zwiększenia rozdzielczości obrazu (np. metoda

dwusześcienna) poza metodą najbliższych sąsiadów powodują np. rozmywanie krawędzi. Wydaje się, że dodawanie pikseli pochodzących z interpolacji nie prowadzi do zwiększenia informacji w obrazie, a jedynie do zwiększenia ilości danych.

- Str. 67 – W pracy napisano: *metoda najbliższych sąsiadów może być jedynie traktowana jako podstawowy punkt odniesienia dla pozostałych bardziej zaawansowanych matematycznie metod*. Metoda najbliższych sąsiadów jest nie tylko metodą podstawową, jest przydatna np. wszędzie tam, gdzie następuje wielokrotna zmiana rozdzielczości (np. wielokrotne pomniejszanie i powiększanie), w przypadku innych metod obraz wtedy rozmywa się. Oczywiście z punktu widzenia percepcji człowieka efekt końcowy jest słabszy, ale metoda ta jest odwracalna i nie wprowadza do obrazu szumu.
- Str. 71-72 - macierz współpояwień - czy wyznaczana była dla wszystkich poziomów jasności, czy też zostały one zredukowane?
- Str. 116 - Tworzenie maski binarnej. Dlaczego tworzenie maski binarnej odbywa się najpierw przez interpolację konturu, który jest już znany? Dodatkowo, później następuje wyliczenie obszaru maski - dlaczego nie użyto np. wypełniania obszaru dla narysowanego konturu?
- Str. 187 – W pracy napisano: *Cztery wymienione metody (cechy statystyczne, kształtowe, pozycyjne, sekwencyjne) są narzędziami wcześniej nieanalizowanymi w literaturze dotyczącej obrazów medycznych*. Czy na pewno wymienione rodziny cech nie pojawiają się w literaturze dotyczącej przetwarzania obrazów medycznych? W rozprawie doktorskiej prof. Markiewicza i późniejszych jego pracach zarówno cechy statystyczne, jak i kształtowe pojawiają się często.

6. Ocena końcowa rozprawy

Moja ocena pracy doktorskiej jest jak najbardziej pozytywna. Rozprawa od strony redaktorskiej jest bardzo starannie napisana, nie zauważyłem literówek i innych błędów edytorskich. Podział pracy na siedem rozdziałów i dodatki jest przejrzysty. Wykresy i rysunki są czytelne, odpowiednio opisane i podpisane. Recenzowana praca świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez jej Autorkę, która wykazała, że dysponuje dużą wiedzą pozwalającą na przygotowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych, a także posiada solidne podstawy teoretyczne. Recenzowana rozprawa doktorska opisuje oryginalny, nietrywialny oraz ważny społecznie i ważny z punktu widzenia dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja problem naukowy. Pani mgr inż. Aleksandra Osowska-Kurczab przedstawiła oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego. Uzyskane przez nią wyniki są osiągnięciem naukowym o wysokiej randze. Spełnia ona również w mojej ocenie wszystkie wymagania zawarte w aktualnie obowiązującej Ustawie w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i może być przedmiotem publicznej obrony. Dodatkowo **wniosuję do Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja o nadanie wyróżnienia pracy pani mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab.**

Michał Kruk

Łódź, 30 stycznia 2024 r.

prof. dr hab. inż. Michał Strzelecki
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej
ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź
michal.strzelecki@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab
**„Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek
na podstawie obrazowania tomograficznego”**
promotor prof. dr hab. inż. Tomasz Markiewicz

Podstawą niniejszej recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z 8 grudnia 2023 r. powołująca mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr inż. Aleksandrze Osowskiej-Kurczab, prowadzonym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Dynamiczny rozwój metod sztucznej inteligencji powoduje, że znajdują one zastosowania w coraz większej liczbie obszarów. Należy do nich również medycyna, gdzie metody te są od dawna używane m.in. do wspomagania diagnostyki, planowania terapii, monitorowania jej skutków czy predykcji rokowań procesu terapeutycznego. Szczególnie rośnie znaczenie algorytmów AI opracowywanych do analizy obrazów medycznych, których celem jest wsparcie lekarzy podczas przeprowadzania diagnostyki obrazowej. Udział takich metod jest nieunikniony ze względu na rosnącą, w ostatnich latach, liczbę badań obrazowych pochodzących z różnych modalności przy jednocześnie utrzymującej się na zbliżonym poziomie liczbie lekarzy radiologów. Recenzowana rozprawa wpisuje się w ten obszar badawczy, ponieważ jej celem jest opracowanie systemu komputerowego umożliwiającego automatyczną klasyfikację wybranych zmian patologicznych nerek. Tematykę rozprawy uważam zatem za bardzo ważną i aktualną, ponieważ opracowane metody analizy obrazów, po weryfikacji w warunkach klinicznych, mogą znaleźć zastosowanie w praktyce medycznej.

Wybrany temat badawczy jest ambitny, gdyż system opracowany przez Autorkę rozprawy analizuje aż 7 różnych zmian chorobowych (większość znanych w literaturze rozwiązań uwzględnia mniejszą liczbę takich zmian), ponadto dokonała Ona skutecznej fuzji dwóch podejść uczenia maszynowego: klasycznego, wykorzystującego analizę tekstury obrazu oraz uczenia głębokiego testując różne rodzaje architektur sieci konwolucyjnych. W rozprawie sformułowano trzy tezy:

Teza 1: Możliwe jest stworzenie zautomatyzowanej metody pozwalającej na różnicowanie 7 typów guzów nerek z wysoką dokładnością jedynie na podstawie obrazowania CT z kontrastem. Pojedyncza faza tego badania jest wystarczającym źródłem informacji do stworzenia systemu opisu i klasyfikacji guzów nerek.

Teza 2: Połączenie różnych metod reprezentacji obrazów radiologicznych pozwala na poprawę dokładności klasyfikacji. W szczególności, połączenie metod neuronowej reprezentacji z operatorami teksturalnymi pozwala na uzyskanie wyników na poziomie aktualnego stanu wiedzy (ang. SOTA) ale przy znacznie większej liczbie reprezentowanych klas.

Teza 3: Metody przetwarzania obrazów, takie jak np. zmiana rozdzielczości, normalizacja czy ekstrakcja ROI mają znaczący wpływ na zdolności generalizacyjne systemów predykcyjnych w zadaniu analizy obrazowania medycznego.

Przedstawione tezy są sformułowane poprawnie. Pewne uwagi mam do tezy 3: badania dotyczące sposobu wyznaczania obszarów zainteresowania oraz ich normalizacji są już prowadzone od dawna. Zostało również wykazane (w szczególności w odniesieniu do analizy tekstury), że te dwa aspekty mają istotny wpływ na wyniki analiz szerokiej klasy obrazów medycznych. Teza ta została już, przynajmniej w części, udowodniona.

Rozprawa została podzielona na 7 rozdziałów. Pierwszy rozdział ma charakter wprowadzający w tematykę rozprawy, zawiera szczegółowo przedstawiony stan wiedzy, cel oraz tezy pracy. W rozdziale 2 określono problem badawczy, przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące diagnostyki nerek oraz opisano bazę danych wykorzystywanych w badaniach wraz z dogłębną analizą eksploracyjną zbioru obrazów. Rozdział 3 omawia wybrane pojęcia oraz metody z zakresu przetwarzania i analizy obrazów, koncentrując się na metodach stosowanych w rozprawie, w tym metody interpolacji danych użyte do zmiany rozdzielczości analizowanych obrazów. Przedstawiono tu również wybrane metody analizy tekstury obrazu oraz zestaw parametrów tekstury wykorzystywany w badaniach. W rozdziale 4 zaprezentowano klasyczne metody uczenia maszynowego. Omówiono także kilka wybranych metod selekcji cech oraz zagadnienia związane z problematyką uczenia głębokiego, w tym właściwości wykorzystywanych przez Autorkę rozprawy kilku architektur sieci splotowych. Przedstawiono również metody klasyfikacji zespołowej oraz metody walidacji klasyfikatorów jak i miary jakości stosowane do oceny jakości klasyfikacji. Rozdział omawia też metody redukcji wymiarowości przestrzeni danych wejściowych (PCA, TSNE, UMAP). Metody te jednak błędnie zostały zaklasyfikowane jako metody uczenia nienadzorowanego. Jednak te podejścia nie reprezentują algorytmów jakiegokolwiek uczenia, zapewniają jedynie zestaw parametrów uzyskanych z odpowiedniej transformacji cech wejściowych opisujących dane zjawisko. Dopiero taki zestaw parametrów może stanowić wejście dla algorytmów uczących (nadzorowanych lub nie).

Rozdział 5 przedstawia zastosowane w analizie obrazów modele uczenia maszynowego a także omawia wszystkie niezbędne kroki potrzebne do poprawnego użycia tych modeli. Opisano metody tworzenia zbiorów uczących i testowych, w tym obszarów zainteresowania oraz ich normalizacji. Przedstawiono schematy analizy obrazów z wykorzystaniem analizy tekstury oraz z użyciem wybranych architektur sieci głębokich. Zaprezentowano metody wyboru klasyfikatorów w zestawach jak i zasady agregacji wyników wygenerowanych przez poszczególne klasyfikatory. Pokazano również sposoby walidacji stosowanych modeli uczenia maszynowego. Należy stwierdzić, że wszystkie opisane tu metody zostały wybrane i zastosowane poprawnie z punktu widzenia uzyskania poprawnego rozwiązania zdefiniowanego w rozprawie problemu klasyfikacji obrazów.

W rozdziale 6 opisano uzyskane wyniki klasyfikacji obrazów dla wszystkich przeprowadzonych eksperymentów. Przeprowadzono ich bardzo dużo: obejmowały problem klasyfikacji zdefiniowany dla dwóch, trzech oraz wszystkich 7. klas patologii, przy czym grupowanie poszczególnych zmian chorobowych zostało dobrze uzasadnione bądź naturą tych zmian lub poziomem trudności ich klasyfikacji. W badaniach wykorzystano również wszystkie opisane w rozdziale 5 modele uczenia maszynowego. Uzyskane wyniki przedstawiono bardzo starannie, uwzględniając poza typowo prezentowanymi elementami oceny jakości klasyfikacji takimi jak wartości miar czy macierze pomyłek, także rozkłady parametrów tekstury po transformacji UMAP, listę cech tekstury odgrywających największą rolę w procesie klasyfikacji czy przykłady błędnych diagnoz wygenerowanych przez algorytmy. Te dodatkowe informacje są bardzo przydatne dla lepszego zrozumienia uzyskanych wyników i oceny użytych modeli. Otrzymane wyniki zostały starannie przedyskutowane również w odniesieniu do podobnych wyników opublikowanych w literaturze. Przekonujące jest także wyjaśnienie przewagi algorytmów stosujących analizę tekstury w porównaniu do metod uczenia głębokiego. Choć obecnie w piśmiennictwie dominuje stosowanie (często bezkrytyczne) algorytmów uczenia głębokiego, to Doktorantka wykazała, że w określonych okolicznościach tekstura skutecznie odwzorowuje właściwości obrazowanych narządów. W tym rozdziale przedstawiono również wyniki uzyskane dla zespołu klasyfikatorów, analizując wpływ doboru członków zespołu oraz metody agregacji ich wyników. Stosując to podejście, uzyskano poprawę wartości miar jakości klasyfikacji w zakresie 2%-5%, w zależności od realizowanego zadania. Ostatnia część rozdziału szóstego zawiera bardzo szeroką analizę ilościową oraz jakościową zespołowego modelu 7-klasowego zapewniającego najlepsze wyniki klasyfikacji. Z użyciem metody GradCam pokazano mapy aktywacji dla wybranej warstwy sieci konwolucyjnej. Szczególnie interesująca jest identyfikacja istotnych z punktu widzenia jakości klasyfikacji parametrów medycznych i populacyjnych obrazowanych pacjentów.

W rozdziale 7 podsumowano uzyskane wyniki, potwierdzono udowodnienie postawionych w rozprawie tez oraz wskazano kierunki dalszych badań. Praca zawiera również 6 dodatków. W pierwszych trzech omówiono wpływ hiperparametrów modeli na wyniki klasyfikacji w zadaniu 3-klasowym, przedstawiono wyniki badań odporności klasyfikatorów dla nieklasyfikowalnych przypadków nowotworów nerek i zawarto dodatkowe elementy analizy eksploracyjnej. Nieco zbędne wydają się kolejne dodatki (D, E, F), które zawierają nadmiarowe informacje biorąc pod uwagę bardzo dużą objętość rozprawy.

Liczący 264 pozycje wykaz literatury obejmuje wszystkie najważniejsze pozycje literatury światowej dotyczące tematyki związanej z rozprawą. Proponuję, aby Doktorantka zapoznała się z publikacją M. Kociołek, et al., Does image normalization and intensity resolution impact texture classification?, CMIG, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2020.101716>,

gdzie omówiono wpływ wstępnego przetwarzania obrazów na wyniki analizy ich tekstury. Wykaz publikacji zawiera również 4 publikacje współautorskie, zamieszczone materiałach konferencyjnych (w tym jeden referat w materiałach bardzo dobrej konferencji IJCNN) oraz w czasopiśmie Bulletin of the Polish Academy of Sciences i Expert Systems with Applications.

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Doktorantka osiągnęła założone cele badawcze oraz udowodniła postawione tezy dzięki opracowaniu i walidacji nowatorskiego systemu do klasyfikacji wybranych guzów nerek w obrazach TK. Uważam, że jest to znaczące osiągnięcie badawcze, gdyż system integruje wiele metod przetwarzania i analizy obrazów. Doktorantka wykonała bardzo dużo eksperymentów analizując wpływ na działanie systemu różnych metod wstępnego przetwarzania obrazów, wyboru obszarów zainteresowania, rodzajów klasycznych klasyfikatorów, architektur sieci głębokich oraz ich hiperparametrów. Opracowała także skuteczne metody selekcji różnych typów algorytmów tworząc zespoły klasyfikatorów. System stanowi udaną fuzję klasycznych i głębokich metod uczenia maszynowego. W efekcie zostało wykazane, że połączenie obydwu podejść, a w szczególności uwzględnienie metod analizy tekstury obrazu, prowadzi do poprawy skuteczności klasyfikacji. Należy podkreślić, że dla osiągnięcia celów pracy mgr inż. Aleksandra Osowska-Kurczab musiała się wykazać głęboką wiedzą z dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja a także umiejętnościami inżynierskimi umożliwiającymi implementację opracowanego systemu.

Praca generalnie nie budzi również zastrzeżeń od strony redakcyjnej. Chciałbym tylko prosić o wyjaśnienie pojęć „krzepkie metody reprezentacji danych” i „krzepkie działania systemu” w kontekście użycia pojęcia „krzepkie”.

Lektura pracy nasuwa również kilka przedstawionych poniżej uwag dyskusyjnych oraz sugestii dotyczących przyszłych badań.

1. Jedynym zauważonym ograniczeniem rozprawy jest wykorzystanie w badaniach dość ograniczonego zbioru obrazów pochodzących z jednego tomografu komputerowego. Czy Doktorantka planuje weryfikację opracowanego systemu dla większego zakresu danych, w szczególności pochodzących z wielu ośrodków medycznych?
2. W przypadku przyszłych badań dotyczących wpływu ROI na wyniki klasyfikacji sugeruję:
 - uwzględnienie większych rozmiarów kwadratowych lub prostokątnych okien ROI wyznaczanych w obszarze zmiany patologicznej. Obecna wielkość kwadratu (21 pikseli) jest na granicy możliwości pozyskania efektywnej informacji o teksturze.
 - zbadanie wpływu redukcji liczby bitów kodujących jasność piksela obrazu na wartości parametrów tekstury. Redukcja do np. 5 bitów prowadzi często do skuteczniejszej klasyfikacji tekstury ze względu na częściową eliminację szumów, co szczególnie jest zauważalne dla parametrów wyznaczanych dla macierzy GLCM.
3. Czy analiza PCA była wykorzystywana w opracowanym systemie? Można rozważyć użycie tej metody do dalszej redukcji liczby parametrów wejściowych dla algorytmów ML, niezależnie od stosowanej selekcji cech.

4. Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób uzyskano rozkłady cech na rys. 2.26 i 2.27. W tekście jest mowa o redukcji wymiarowości zastosowanej dla „surowych wartościach pikseli”, jednak nie opisano, na czym ten proces polega.

Wszystkie moje uwagi nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę recenzowanej pracy. Stwierdzam, że praca „Uczenie maszynowe w zastosowaniu do różnicowania nowotworów nerek na podstawie obrazowania tomograficznego” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab do publicznej obrony.

Jednocześnie uważam, że opracowany w pracy system klasyfikacji obrazów cechuje się wysokim poziomem merytorycznym oraz dużą oryginalnością. Osiągnięcie Doktorantki stanowi zatem istotny wkład do dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Rozwiązanie to ma charakter ogólny i opracowana metodyka klasyfikacji guzów nerek może mieć zastosowania również do analizy innej klasy obrazów biomedycznych pochodzących z różnych modalności. Należy również podkreślić dojrzałość Doktorantki w prowadzeniu badań naukowych oraz przy analizie i ocenie uzyskanych wyników. W związku z powyższym wnioskuję o wyróżnienie rozprawy mgr inż. Aleksandry Osowskiej-Kurczab.

Michał Stach