

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. Estery Kot
**„Multimodal Medical Image Processing Methods for
Computer-Aided Diagnosis Support System of Brain Tumors”**
("Metody przetwarzania wielomodalnych obrazów medycznych do systemu
komputerowego wspomagającego diagnozowanie guzów mózgu")
promotor dr hab. inż. Krzysztof Siwek, prof. ucz.,
promotor pomocniczy dr inż. Zuzanna Krawczyk

Podstawą niniejszej recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z 27 czerwca 2023 r. powołująca mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr. inż. Esterze Kot, prowadzonym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Wzrost wykonywanych badań obrazowych stanowiących obecnie istotny element procesu diagnostycznego spowodował, że lekarze muszą analizować coraz większą liczbę obrazów biomedycznych, często pochodzących z różnych modalności. Analiza takich obrazów staje się procesem niezwykle żmudnym i czasochłonnym, obarczonym często błędami wynikającymi m.in. ze zmęczenia lub nadmiernej rutyny. Z tych względów coraz bardziej przydatne stają się algorytmy sztucznej inteligencji służące wydobywaniu ilościowych informacji z obrazów i wspomagające lekarzy w diagnozie, planowaniu terapii lub monitorowaniu jej skutków. Istotną gałęzią informatyki staje się zatem opracowywanie i rozwój takich algorytmów, które znajdują zastosowanie w coraz liczniejszych specjalnościach medycznych. Recenzowana rozprawa wpisuje się w ten obszar badawczy, ponieważ jej celem jest opracowanie systemu komputerowego umożliwiającego segmentację oraz wyznaczenie

objętości wybranych rodzajów guzów mózgu w celu wspomaganie ich diagnostyki oraz planowania radioterapii. 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 wymaga analizy obrazów pochodzących z różnych modalności: pozytonowej tomografii emisyjnej (PET), umożliwiającej wykrywanie wczesnych zmian nowotworowych oraz tomografii komputerowej (TK) i tomografii rezonansu magnetycznego (TRM), które dostarczają informacji o dokładnej lokalizacji tych zmian w ludzkim organizmie. W rozprawie sformułowano następującą tezę:

Metody wykorzystujące proponowany wieloetapowy schemat głębokiego uczenia, obejmujący wiele sieci neuronowych o różnych architekturach, umożliwiają skuteczne wykrywanie i segmentację guzów mózgu oraz mogą być wykorzystane w celu wsparcia radiologów zarówno podczas etapu diagnostycznego, jak i planowania leczenia.

Przedstawiona teza ma jednoznaczne brzmienie, natomiast jest przedstawiona zbyt ogólnie, ponieważ różne sieci głębokie były już skutecznie stosowane do analizy obrazów guzów mózgu. Ponadto Autorka w swoich badaniach ograniczyła się tylko do jednego rodzaju guza (glejaka wielopostaciowego IV stopnia). Należało w tezie bardziej precyzyjnie odnieść się do właściwości własnych rozwiązań zaproponowanych do rozwiązania zdefiniowanego problemu badawczego.

Rozprawa została podzielona na 8 rozdziałów. Pierwszy rozdział ma charakter wprowadzający w tematykę rozprawy, zawiera omówienie problemu badawczego oraz tezę pracy. W rozdziale 2 przedstawiono zarys zasad działania i zastosowań diagnostycznych urządzeń obrazowania medycznego będących w obszarze zainteresowania Doktorantki (TK, TRM, PET). Opisano tam również współcześnie stosowane metody radioterapii guzów mózgu. Rozdział 3 stanowi przegląd literatury w zakresie wykorzystania sieci głębokich do analizy obrazów biomedycznych, szczególnie w zastosowaniach dotyczących segmentacji struktur anatomicznych oraz fuzji (rejestracji) obrazów różnych modalności. Zidentyfikowano również ograniczenia dotychczasowych metod. W rozdziale 4 przedstawiono autorski system MeDAPR (Medical Data Processing), który służy do analizy obrazów oraz szacowania wielkości guzów i obejmuje m.in. moduły przetwarzania obrazu, fuzji obrazów pochodzących z różnych modalności, augmentacji danych, klasyfikacji i segmentacji wybranych struktur, wizualizacji wyników analiz. Omówiono także właściwości wykorzystywanych przez Autorkę rozprawy kilku architektur sieci głębokich.

Rozdział 5 opisuje opracowane algorytmy segmentacji obrazów z użyciem metody aktywnego konturu, a w szczególności jej nieparametrycznej wersji określanej jako metoda zbiorów poziomicowych (ang. level set). Pierwszym krokiem tej metody jest usuwanie obszarów kości w analizowanych obrazach, co jest niezbędne dla uzyskania poprawnej segmentacji struktur mózgu. Obszar kości wykrywano w obrazach PET i CT na podstawie progowania (globalnego i lokalnego, z manualnie ustalonymi wartościami progów), tkanka kostna była usuwana w obrazach CT a następnie na podstawie uzyskanych wyników w obrazach PET po ich przeskalowaniu do rozdzielczości danych CT. Następnie guzy segmentowano w obrazach PET korzystając z dwóch rodzajów funkcji sterującej ewolucją zbiorów poziomicowych (funkcje Chan-Vese i gradientowa). Do walidacji opracowanej metody wykorzystano fantom PET-CT firmy Biodex Medical Systems, zawierający m.in. sfery

o znanych średnicach. Użycie fantomu pozwoliło na dobór optymalnych wartości progów stosowanych we wstępnym etapie analizy obrazów. Przyjęto na drodze eksperymentów takie wartości progów, które zapewniły dokładne wyniki segmentacji sfer fantomu, zweryfikowane dzięki uzyskaniu zgodnych z rzeczywistością wartościom objętości tych sfer. Pomysł wykorzystania tego fantomu uważam za bardzo dobry, ponieważ umożliwił uniezależnienie się od arbitralnie dobranych wartości progów czyniąc w efekcie zaproponowaną metodę bardziej uniwersalną i wiarygodną.

W rozdziale 6 opisano eksperymenty związane z segmentacją obrazów zawierających guzy za pomocą sieci głębokich o różnych architekturach. W pierwszej metodzie zmodyfikowano przedstawiony uprzednio schemat segmentacji wprowadzając sieć UNet do wykrywania obszarów kości czaszki. Kolejną modyfikacją było wprowadzenie dodatkowych operacji morfologicznych (erozja, dylatacja) przed zastosowaniem metody zbiorów poziomicowych, co poprawiło dokładność segmentacji guza. Kolejne przeprowadzone eksperymenty dotyczyły analizy obrazów powstałych w wyniku fuzji różnych modalności (PET, CT, MRI). Dopasowanie obrazów różnych typów jest potrzebne, jako że przekazują one różne, uzupełniające się informacje, dotyczące struktur anatomicznych (CT, MRI) oraz wizualizacji samego obszaru guza (PET). Do fuzji obrazów PET i CT wykorzystano znaną z literatury metodę wykorzystującą sieci VGG19. Ostatnim etapem była rejestracja obrazów MRI, gdzie m.in. zastosowano informacje o geometrii występujących tam struktur mózgu. Do segmentacji takich obrazów użyto sieci o różnych architekturach (UNet, Yolo, ResNet). Interesującym pomysłem było zastosowanie dwuetapowej segmentacji z użyciem sieci Yolo lub ResNet do detekcji obszaru występowania guza oraz sieci UNet do jego docelowej dokładnej segmentacji w wykrytych wcześniej obszarach. Rozdział ten opisuje również opracowane narzędzia programistyczne do augmentacji danych oraz anotacji analizowanych obrazów jak i interesujący przepis na określenie głębokości struktury sieci UNet na podstawie rozmiarów obrazów wejściowych. W tym rozdziale przedstawiono również wyniki segmentacji obrazów RM prostaty z użyciem sieci Yolo, jednak to zagadnienie nie jest związane bezpośrednio z celami i zakresem tej rozprawy.

Rozdział 7 przedstawia propozycję platformy informatycznej z wykorzystaniem chmury obliczeniowej do trenowania i uruchamiania modeli sztucznej inteligencji w trybie wsadowym, która umożliwi uczenie federacyjne (możliwość wspólnego uczenia i walidacji modeli AI przez różne jednostki). Zaproponowana architektura pozwala na równoległe przetwarzanie danych oraz implementuje narzędzi z kategorii „explainable AI” (XAI). Będzie to miało duże znaczenie dla użytkowników platformy – lekarzy, których sceptycyzm w stosunku do wyników generowanych przez algorytmy uczenia maszynowego może zostać osłabiony dzięki takim narzędziom, próbującym uzasadnić decyzje podejmowane przez te algorytmy. Jednak opisane w tym rozdziale rozwiązania są obecnie pewną wizją Doktorantki, a ocena ich przydatności i skuteczności nastąpi dopiero po implementacji proponowanej platformy w jednostce klinicznej.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie pracy. Zestawiono tam najważniejsze uzyskane wyniki oraz nakreślono kierunki dalszych badań.

Liczący 135 pozycje wykaz literatury obejmuje najważniejsze pozycje literatury światowej dotyczące tematyki związanej z rozprawą. Wykaz ten zawiera również 13 publikacji współautorskich zamieszczonych w głównie materiałach konferencyjnych (w tym dwa referaty przedstawiono na bardzo dobrej konferencji IJCNN) oraz w czasopiśmie Bulletin of the Polish Academy of Sciences.

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Doktorantka osiągnęła założone cele badawcze oraz udowodniła postawioną tezę dzięki opracowaniu różnych metod segmentacji guzów mózgu z wykorzystaniem sieci głębokich oraz metod klasycznych. Należy podkreślić, że dla osiągnięcia celów pracy mgr inż. Estera Kot musiała się wykazać wiedzą z dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja a także umiejętnościami inżynierskimi umożliwiającymi implementację wielu opracowanych metod przetwarzania i analizy obrazów. Do najważniejszych osiągnięć Autorki pracy zaliczam opracowanie i implementację:

1. nowej metody segmentacji guzów mózgu w obrazach PET i CT z użyciem wspomaganiej operacjami morfologicznymi metody zbiorów poziomicowych oraz sieci głębokich.
2. systemu analizy obrazów guzów mózgu różnych modalności umożliwiającego wstępne przetwarzanie, fuzję, augmentację danych, detekcję i segmentację guzów z wykorzystaniem różnych architektur sieci głębokich.

Praca jest napisana zrozumiałym językiem angielskim. Rozprawa generalnie nie budzi również zastrzeżeń od strony redakcyjnej. Wyjątek dotyczy opisu tomografii RM (p. 2.3) gdzie napisano „...electromagnet, the power of which can oscillate within 3 Tesla”. Jak rozumiem, Autorka miała tu na myśli wartość indukcji pola magnetycznego występującego w magnesie, a nie jego moc. Ponadto wartość ta nie oscyluje wokół 3T, tylko przyjmuje dokładnie tę wartość (lub inne, niemniej zawsze precyzyjnie określone). Należało też doprecyzować, że chodzi o „superconducting electromagnet”.

Lektura pracy nasuwa również kilka przedstawionych poniżej uwag polemicznych i dyskusyjnych.

1. Pewnym mankamentem rozprawy jest brak porównania dokładności opracowanych metod segmentacji w wynikami opublikowanymi w literaturze, uzyskanymi przez innych autorów. Brak takiego porównania uniemożliwia pełną ocenę skuteczności zastosowanych rozwiązań, w tym ich potencjalnej przydatności w diagnostyce klinicznej.
2. W rozprawie zabrakło również kompleksowego porównania dokładności wszystkich opracowanych metod, a także przedyskutowania ich właściwości, w tym ograniczeń. Nie bardzo wiadomo w związku z tym, która z tych metod jest optymalna z punktu widzenia planowanych zastosowań klinicznych. Szczególnie interesujące byłoby porównanie metod klasycznych oraz wykorzystujących uczenie głębokie. Ponadto przedstawione wyniki oceny dokładności metod dotyczą zaledwie 6 pacjentów, to zbyt mało, aby wiarygodnie ocenić ich skuteczność.
3. Typowe jest przeprowadzanie fuzji obrazów PET/C oraz PET/MRI. Proszę natomiast o uzasadnienie potrzeby fuzji obrazów CT oraz MRI. Czy analiza takich dopasowanych obrazów poprawiła w jakiś sposób wyniki segmentacji?
4. Proszę o porównanie złożoności obliczeniowej oraz czasu obliczeń poszczególnych zaimplementowanych w pracy metod analizy obrazów.
5. Proszę o uzasadnienie wzorów 2.1-2.3 określających transformacje rozkładów jasności obrazów różnych modalności. W jaki sposób dobrano występujące tam wartości, czym jest x_{max} , w jaki sposób były kodowane te obrazy, jaki rzeczywisty zakres jasności obrazowanych struktur?



6. Czy otrzymane wyniki analizy obrazów były konsultowane ze środowiskiem medycznym? Czy Doktorantka widzi w przyszłości możliwość zastosowania opracowanych metod w systemie wspomagania diagnostyki obrazowej w praktyce klinicznej jak i implementacji proponowanej w rozdziale 7 platformy obliczeniowej?

Wszystkie moje uwagi krytyczne i dyskusyjne nie wpływają na pozytywną ocenę recenzowanej pracy. Stwierdzam, że praca „Multimodal Medical Image Processing Methods for Computer-Aided Diagnosis Support System of Brain Tumors” 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. Estery Kot do publicznej obrony.

Mu Stali

