Wrocław, 22 lipca 2024 r.

Prof. Michał Woźniak
Politechnika Wrocławska
Katedra Systemów i Sieci Komputerowych
michal.wozniak@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Mateusza Buczowskiego
zatytułowanej:
Komputerowe metody analizy i przetwarzania obrazów medycznych
Promotor: prof. dr hab. inż. Khalid Saeed

1. Problem badawczy i jego znaczenie

W pracy rozważane są zagadnienia związane z wykorzystaniem metod przetwarzania obrazów, głównie w zakresie segmentacji małych obiektów (zdjęcia mikroskopowe, bądź mikro-tomografia). Praca ma charakter naukowo-aplikacyjny- Doktorant proponuje w pracy autorskie tory przetwarzania oraz segmentacji obrazów, a także dokonuje ich ewaluacji na drodze eksperymentu komputerowego. Opracowane metody mogą być podstawą do budowy efektywnych systemów wizyjnych, które mogą znaleźć zastosowanie we wspomaganej komputerowo analizie zdjęć wykorzystywanych w diagnostyce medycznej.

2. Wkład autora

Zakres oraz zawartość rozprawy oceniam pozytywnie. Sformułowana w pracy dość złożona teza nie jest jednak zbyt precyzyjna. Autor wskazuje, że klasyczne metody segmentacji obrazów zwracają satysfakcjonujące wyniki dla rozważanych w pracy problemów, a także że mogą one stanowić uzupełnienie algorytmów bazujących na modelach głębokich. Dodatkowo, teza mówi, że dla rozważanych w pracy problemów, indywidulane przetwarzanie obiektów pozawala zwiększyć jakość kosztem złożoności obliczeniowej. Nie wskazano jednak np. co należy uznać za poziom satysfakcjonujący. Mimo tej uwagi uważam tezę za ambitną, podobnie, jak towarzyszące jej cele pracy, do których można byłoby się w rozprawie ograniczyć.
Praca podzielona jest na trzy części. W pierwszej dokonano wprowadzenia w tematykę przetwarzania obrazów, z naciskiem na metody filtracji oraz segmentacji obrazów. Część ta

napisana jest dobrze i świadczy tym, że Doktorant posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie nauk fizycznych, ze szczególny uwzględnieniem metod związanych z analizą obrazów medycznych. W drugiej części zaprezentowano szereg autorskich algorytmów segmentacji dla wybranych problemów praktycznych, tj. zaszumionych obrazów z mikrotomografii, zdjęć mikroskopowych oraz zdjęć z mikroskopu sił atomowych. Dla wszystkich problemów Doktorant zaprezentował oryginalny potok przetwarzania oraz przedstawił wyniki badań eksperymentalnych. W ostatniej części pracy znalazło się podsumowanie osiągniętych wyników, a także podrozdział zawierający ciekawą analizę możliwych kierunków rozwoju algorytmów segmentacji wykorzystujących modele głębokie, w tym tzw. *fundation model* oraz wielkie modele językowe (LLM). W mojej opinii ta część zasługuje na samodzielną publikację, być może w formie publikacji popularno-naukowej, bądź w czasopiśmie typu *IEEE Computational Intelligence Magazine* i utwierdza mnie w przekonaniu o znajomości najnowszych trendów w obszarze uczenia maszynowego przez Kandydata.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- Zaproponowanie potoku przetwarzania porowatych struktur pochodzących z mikrotomografii, gdzie w pierwszym etapie wyodrębnia się obiekty, które w kolejnym kroku są poddawane segmentacji.
- Opracowanie autorskiego dwuetapowego algorytmu przetwarzania zdjęć mikroskopowych w celu segmentacji obrazów erytrocytów, w którym na drugim etapie przetwarzane są indywidualne obrazy komórek, co pozwala zwiększyć jakość segmentacji.
- Zaproponowanie potoku przetwarzania obrazów pochodzących z mikroskopu sił atomowych w celu pokazania tekstury powierzchni i pozwalającego na wyciągnięcie ciekawych wniosków na temat wnikania dwutlenku tytanu do wnętrza erytrocytów.
- Ocenę zaproponowanych metod na drodze eksperymentów komputerowych.
- Analizę możliwych kierunków rozwoju algorytmów analizy obrazów.

Wyniki uzyskiwane w trakcie pracy nad rozprawą zostały zawarte w czterech publikacjach, w tym dwóch artykułach opublikowanych w czasopismach międzynarodowych (jeden z nich w czasopiśmie indeksowanym w JCR).

3. Poprawność

Struktura pracy nie budzi zastrzeżeń, przy czym wydaje się, że wspomniany rozdział dotyczący perspektywy rozwoju metod przetwarzania obrazów mógłby być samodzielnym opracowaniem - być może właściwe byłoby umieszczenie go w tzw. części teoretycznej

rozprawy. Podobnie, niektóre elementy zawarte w część eksperymentalnej, np. rozdział 5.1, zawierający opis działania mikro-tomografii, mogłyby być także tam umieszczone.
Lektura rozprawy prowadzi do sformułowania poniższych uwag.

- Jak wcześniej wspomniano, teza pracy jest dość złożona i nieprecyzyjna. Wdaje się, że bez szkody dla rozprawy można byłoby ją pominąć, pozostawiając jedynie cele pracy.
- Brak jest pytań badawczych, na które Doktorant chciał odpowiedzieć w trakcie eksperymentów.
- Opisy zaproponowanych algorytmów (potoków przetwarzania) są poprawne, ale opisy każdego z nich mają różną formę, albo stosowany jest zapis w postaci diagramu przepływów (patrz rys. 5.9), albo w postaci pseudokodu (patrz rozdz. 6), bądź jest to dość niesformalizowany opis algorytmu, jak to mam miejsce w rozdziale 7. Dla większej czytelności Doktorant powinien zunifikować formę prezentacji zaproponowanych metod, np. w postaci diagramu przepływów bądź pseudokodu.
- Szkoda, że Kandydat nie rozszerzył badań w rozdziale 6 poprzez wykorzystanie do pierwszego etapu wspominanego rozwiązania firmy Meta *Segment Anything*.
- W rozdziale 6.5 Doktorant wspomina o dużej złożoności obliczeniowej zaproponowanej metody, co ogranicza zakres jest stosowania do problemów, gdyż czas odpowiedzi nie jest krytyczny, jednak nie podejmuje próby jej oszacowania. Przedstawione w Tab. 6.5. informacje o czasach przetwarzania są dyskusyjne, ze względu na fakt, że oceniają one nie tylko efektywność algorytmu, ale także jakość jego implementacji. Łatwo wyobrazić sobie, że nawet efektywny obliczeniowo algorytm jest niepoprawnie zaimplementowany.
- W częściach eksperymentalnych nie jest jasny protokół eksperymentalny, a także przesłanki jakim kierował się Autor w przypadku wyboru metryk jakości. Moim zdaniem warto byłoby poświęcić podrozdział w części pierwszej pracy, gdzie znalazłaby się ich definicja. Brak jest także jasno sprecyzowanych pytań badawczych.
- Dlaczego w Tab. 6.6 zawarto jedynie wartości precyzji (precision)? Zysk na jednej metryce często okupiony jest pogorszeniem się jakości z punktu widzenia innych metryk - warto byłoby pokazać jak to wygląda dla wcześniej analizowanego zestawu metryk.
- W pracy brak jest precyzyjnych informacji na temat środowiska programistycznego (choć można domyśleć się, że był to *Python*), w jakim wykonano eksperymenty (wspomniano np. o wykorzystywanych bibliotekach, ale bez podania ich wersji) ani nie udostępniono repozytorium wykorzystanego w ich trakcie kodu.
- Brak jest porównań zaproponowanych metod z rozwiązaniami *state-of-the-art*.

- Dostrzeżono także drobne błędy językowe (np. Doktorant nagminnie stosuje „ilość" zamiast „liczba" do rzeczowników policzalnych), a także redakcyjne, np. nie powinno się wydzielać podrozdziału 2.4.1, gdy nie ma 2.4.2.

4. Wiedza kandydata

Ja wspomniałem wcześniej, Doktorant posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie nauk fizycznych, ze szczególny uwzględnieniem metod związanych z analizą obrazów medycznych. Doktorant potrafi zaproponować oryginalne potoki przetwarzania informacji obrazowej z wykorzystaniem znanych z literatury algorytmów, a potrafi przeprowadzić eksperyment komputerowy w celu oceny jakości zaproponowanych metod. Przegląd literaturowy dotyczący zagadnień przedstawionych w rozprawie pozwala stwierdzić, że doktorant posiada aktualną wiedzę z zakresu tematyki rozprawy, a także potrafi dokonać krytycznego przeglądu źródeł w celu wskazania ciekawych kierunków badań, co zademonstrował m.in. w rozdziale 8.3, który zasługuje na samodzielną publikację. Zawarty w dysertacji spis źródeł literaturowych, zawierających 97 pozycji, jest aktualny i reprezentatywny.

5. Podsumowanie

Doktorant wykazał się w recenzowanej rozprawie właściwie stosowanym podejściem eksperymentalnym oraz dobrą znajomością aktualnej problematyki związanej metodami przetwarzania informacji obrazowej. Zostało to poparte dobrymi studiami literaturowymi, obejmującymi aktualne piśmiennictwo związane z problematyką rozprawy, co świadczy o bardzo dobrej wiedzy doktoranta z tego zakresu. Dla poruszanych problemów, z zakresu analizy małych obiektów, Doktorant sformułował użyteczne potoki przetwarzania informacji, głównie koncentrujące się na wyodrębnieniu ciekawych regionów (ROI) i ich precyzyjnej segmentacji. Doktorant przeanalizował wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych, ocenił jakość zaproponowanych metod oraz wskazał możliwości dalszego rozwoju w obszarze związanym z rozprawą. Na podkreślenie zasługuje umiejętność krytycznego spojrzenia na otrzymane rezultaty oraz wskazanie słabości zaproponowanych przez siebie rozwiązań, a także możliwości użycia wybranych autorskich rozwiązań ewentualnych w przyszłych pracach badawczych.

Recenzowana dysertacja przedstawia rozwiązanie oryginalnego problemu, wzbogacając naszą wiedzę dotyczącą metod segmentacji obrazów. Zawarte w niej wyniki badań eksperymentalnych wskazują również na możliwość wykorzystania otrzymanych metod w praktyce.

Przedstawione w punkcie 3 recenzji uwagi mają jedynie charakter dyskusyjno-porządkowy, w żaden sposób nie deprecjonując osiągniętych przez doktoranta rezultatów oraz nie wpływają na pozytywne wrażenie o przedłożonej rozprawie. Mogą być one przydatne w przypadku dalszego publikowania rezultatów zawartych w rozprawie. Jestem przekonany, że Doktorant zdaje sobie sprawę z możliwości kontynuowania rozpoczętej w pracy tematyki, czemu dał wyraz prezentując bardzo rozbudowaną analizę możliwych kierunków dalszych prac, głównie z wykorzystaniem tzw. *foundation models* oraz dużych modeli językowych.

Reasumując, biorąc pod uwagę powyższe opinie i wymagania stawiane pracom stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Mateusza Buczkowskiego pt. „Komputerowe metody analizy i przetwarzania obrazów medycznych" spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, w szczególności:

- Rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.
- Kandydat posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie nauk fizycznych, ze szczególny uwzględnieniem metod związanych z analizą obrazów.
- Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr inż. Mateusza Buczkowskiego do publicznej obrony oraz biorąc pod uwagę oryginalność zaproponowanych rozwiązań, dorobek publikacyjny i dojrzałość naukową Kandydata wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Wrocław, 22 lipca 2024 r.

Prof. Michał Woźniak
Politechnika Wrocławska
Katedra Systemów i Sieci Komputerowych
michal.wozniak@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Mateusza Buczowskiego
zatytułowanej:
Komputerowe metody analizy i przetwarzania obrazów medycznych
Promotor: prof. dr hab. inż. Khalid Saeed

1. Problem badawczy i jego znaczenie

W pracy rozważane są zagadnienia związane z wykorzystaniem metod przetwarzania obrazów, głównie w zakresie segmentacji małych obiektów (zdjęcia mikroskopowe, bądź mikro-tomografia). Praca ma charakter naukowo-aplikacyjny- Doktorant proponuje w pracy autorskie tory przetwarzania oraz segmentacji obrazów, a także dokonuje ich ewaluacji na drodze eksperymentu komputerowego. Opracowane metody mogą być podstawą do budowy efektywnych systemów wizyjnych, które mogą znaleźć zastosowanie we wspomaganej komputerowo analizie zdjęć wykorzystywanych w diagnostyce medycznej.

2. Wkład autora

Zakres oraz zawartość rozprawy oceniam pozytywnie. Sformułowana w pracy dość złożona teza nie jest jednak zbyt precyzyjna. Autor wskazuje, że klasyczne metody segmentacji obrazów zwracają satysfakcjonujące wyniki dla rozważanych w pracy problemów, a także że mogą one stanowić uzupełnienie algorytmów bazujących na modelach głębokich. Dodatkowo, teza mówi, że dla rozważanych w pracy problemów, indywidulane przetwarzanie obiektów pozawala zwiększyć jakość kosztem złożoności obliczeniowej. Nie wskazano jednak np. co należy uznać za poziom satysfakcjonujący. Mimo tej uwagi uważam tezę za ambitną, podobnie, jak towarzyszące jej cele pracy, do których można byłoby się w rozprawie ograniczyć.
Praca podzielona jest na trzy części. W pierwszej dokonano wprowadzenia w tematykę przetwarzania obrazów, z naciskiem na metody filtracji oraz segmentacji obrazów. Część ta

napisana jest dobrze i świadczy tym, że Doktorant posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie nauk fizycznych, ze szczególny uwzględnieniem metod związanych z analizą obrazów medycznych. W drugiej części zaprezentowano szereg autorskich algorytmów segmentacji dla wybranych problemów praktycznych, tj. zaszumionych obrazów z mikrotomografii, zdjęć mikroskopowych oraz zdjęć z mikroskopu sił atomowych. Dla wszystkich problemów Doktorant zaprezentował oryginalny potok przetwarzania oraz przedstawił wyniki badań eksperymentalnych. W ostatniej części pracy znalazło się podsumowanie osiągniętych wyników, a także podrozdział zawierający ciekawą analizę możliwych kierunków rozwoju algorytmów segmentacji wykorzystujących modele głębokie, w tym tzw. *fundation model* oraz wielkie modele językowe (LLM). W mojej opinii ta część zasługuje na samodzielną publikację, być może w formie publikacji popularno-naukowej, bądź w czasopiśmie typu *IEEE Computational Intelligence Magazine* i utwierdza mnie w przekonaniu o znajomości najnowszych trendów w obszarze uczenia maszynowego przez Kandydata.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- Zaproponowanie potoku przetwarzania porowatych struktur pochodzących z mikrotomografii, gdzie w pierwszym etapie wyodrębnia się obiekty, które w kolejnym kroku są poddawane segmentacji.
- Opracowanie autorskiego dwuetapowego algorytmu przetwarzania zdjęć mikroskopowych w celu segmentacji obrazów erytrocytów, w którym na drugim etapie przetwarzane są indywidualne obrazy komórek, co pozwala zwiększyć jakość segmentacji.
- Zaproponowanie potoku przetwarzania obrazów pochodzących z mikroskopu sił atomowych w celu pokazania tekstury powierzchni i pozwalającego na wyciągnięcie ciekawych wniosków na temat wnikania dwutlenku tytanu do wnętrza erytrocytów.
- Ocenę zaproponowanych metod na drodze eksperymentów komputerowych.
- Analizę możliwych kierunków rozwoju algorytmów analizy obrazów.

Wyniki uzyskiwane w trakcie pracy nad rozprawą zostały zawarte w czterech publikacjach, w tym dwóch artykułach opublikowanych w czasopismach międzynarodowych (jeden z nich w czasopiśmie indeksowanym w JCR).

3. Poprawność

Struktura pracy nie budzi zastrzeżeń, przy czym wydaje się, że wspomniany rozdział dotyczący perspektywy rozwoju metod przetwarzania obrazów mógłby być samodzielnym opracowaniem - być może właściwe byłoby umieszczenie go w tzw. części teoretycznej

rozprawy. Podobnie, niektóre elementy zawarte w część eksperymentalnej, np. rozdział 5.1, zawierający opis działania mikro-tomografii, mogłyby być także tam umieszczone.
Lektura rozprawy prowadzi do sformułowania poniższych uwag.

- Jak wcześniej wspomniano, teza pracy jest dość złożona i nieprecyzyjna. Wdaje się, że bez szkody dla rozprawy można byłoby ją pominąć, pozostawiając jedynie cele pracy.
- Brak jest pytań badawczych, na które Doktorant chciał odpowiedzieć w trakcie eksperymentów.
- Opisy zaproponowanych algorytmów (potoków przetwarzania) są poprawne, ale opisy każdego z nich mają różną formę, albo stosowany jest zapis w postaci diagramu przepływów (patrz rys. 5.9), albo w postaci pseudokodu (patrz rozdz. 6), bądź jest to dość niesformalizowany opis algorytmu, jak to mam miejsce w rozdziale 7. Dla większej czytelności Doktorant powinien zunifikować formę prezentacji zaproponowanych metod, np. w postaci diagramu przepływów bądź pseudokodu.
- Szkoda, że Kandydat nie rozszerzył badań w rozdziale 6 poprzez wykorzystanie do pierwszego etapu wspominanego rozwiązania firmy Meta *Segment Anything*.
- W rozdziale 6.5 Doktorant wspomina o dużej złożoności obliczeniowej zaproponowanej metody, co ogranicza zakres jest stosowania do problemów, gdyż czas odpowiedzi nie jest krytyczny, jednak nie podejmuje próby jej oszacowania. Przedstawione w Tab. 6.5. informacje o czasach przetwarzania są dyskusyjne, ze względu na fakt, że oceniają one nie tylko efektywność algorytmu, ale także jakość jego implementacji. Łatwo wyobrazić sobie, że nawet efektywny obliczeniowo algorytm jest niepoprawnie zaimplementowany.
- W częściach eksperymentalnych nie jest jasny protokół eksperymentalny, a także przesłanki jakim kierował się Autor w przypadku wyboru metryk jakości. Moim zdaniem warto byłoby poświęcić podrozdział w części pierwszej pracy, gdzie znalazłaby się ich definicja. Brak jest także jasno sprecyzowanych pytań badawczych.
- Dlaczego w Tab. 6.6 zawarto jedynie wartości precyzji (precision)? Zysk na jednej metryce często okupiony jest pogorszeniem się jakości z punktu widzenia innych metryk - warto byłoby pokazać jak to wygląda dla wcześniej analizowanego zestawu metryk.
- W pracy brak jest precyzyjnych informacji na temat środowiska programistycznego (choć można domyśleć się, że był to *Python*), w jakim wykonano eksperymenty (wspomniano np. o wykorzystywanych bibliotekach, ale bez podania ich wersji) ani nie udostępniono repozytorium wykorzystanego w ich trakcie kodu.
- Brak jest porównań zaproponowanych metod z rozwiązaniami *state-of-the-art*.

- Dostrzeżono także drobne błędy językowe (np. Doktorant nagminnie stosuje „ilość" zamiast „liczba" do rzeczowników policzalnych), a także redakcyjne, np. nie powinno się wydzielać podrozdziału 2.4.1, gdy nie ma 2.4.2.

4. Wiedza kandydata

Ja wspomniałem wcześniej, Doktorant posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie nauk fizycznych, ze szczególny uwzględnieniem metod związanych z analizą obrazów medycznych. Doktorant potrafi zaproponować oryginalne potoki przetwarzania informacji obrazowej z wykorzystaniem znanych z literatury algorytmów, a potrafi przeprowadzić eksperyment komputerowy w celu oceny jakości zaproponowanych metod. Przegląd literaturowy dotyczący zagadnień przedstawionych w rozprawie pozwala stwierdzić, że doktorant posiada aktualną wiedzę z zakresu tematyki rozprawy, a także potrafi dokonać krytycznego przeglądu źródeł w celu wskazania ciekawych kierunków badań, co zademonstrował m.in. w rozdziale 8.3, który zasługuje na samodzielną publikację. Zawarty w dysertacji spis źródeł literaturowych, zawierających 97 pozycji, jest aktualny i reprezentatywny.

5. Podsumowanie

Doktorant wykazał się w recenzowanej rozprawie właściwie stosowanym podejściem eksperymentalnym oraz dobrą znajomością aktualnej problematyki związanej metodami przetwarzania informacji obrazowej. Zostało to poparte dobrymi studiami literaturowymi, obejmującymi aktualne piśmiennictwo związane z problematyką rozprawy, co świadczy o bardzo dobrej wiedzy doktoranta z tego zakresu. Dla poruszanych problemów, z zakresu analizy małych obiektów, Doktorant sformułował użyteczne potoki przetwarzania informacji, głównie koncentrujące się na wyodrębnieniu ciekawych regionów (ROI) i ich precyzyjnej segmentacji. Doktorant przeanalizował wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych, ocenił jakość zaproponowanych metod oraz wskazał możliwości dalszego rozwoju w obszarze związanym z rozprawą. Na podkreślenie zasługuje umiejętność krytycznego spojrzenia na otrzymane rezultaty oraz wskazanie słabości zaproponowanych przez siebie rozwiązań, a także możliwości użycia wybranych autorskich rozwiązań ewentualnych w przyszłych pracach badawczych.

Recenzowana dysertacja przedstawia rozwiązanie oryginalnego problemu, wzbogacając naszą wiedzę dotyczącą metod segmentacji obrazów. Zawarte w niej wyniki badań eksperymentalnych wskazują również na możliwość wykorzystania otrzymanych metod w praktyce.

Przedstawione w punkcie 3 recenzji uwagi mają jedynie charakter dyskusyjno-porządkowy, w żaden sposób nie deprecjonując osiągniętych przez doktoranta rezultatów oraz nie wpływają na pozytywne wrażenie o przedłożonej rozprawie. Mogą być one przydatne w przypadku dalszego publikowania rezultatów zawartych w rozprawie. Jestem przekonany, że Doktorant zdaje sobie sprawę z możliwości kontynuowania rozpoczętej w pracy tematyki, czemu dał wyraz prezentując bardzo rozbudowaną analizę możliwych kierunków dalszych prac, głównie z wykorzystaniem tzw. *foundation models* oraz dużych modeli językowych.

Reasumując, biorąc pod uwagę powyższe opinie i wymagania stawiane pracom stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Mateusza Buczkowskiego pt. „Komputerowe metody analizy i przetwarzania obrazów medycznych" spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, w szczególności:

- Rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.
- Kandydat posiada ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie nauk fizycznych, ze szczególny uwzględnieniem metod związanych z analizą obrazów.
- Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr inż. Mateusza Buczkowskiego do publicznej obrony oraz biorąc pod uwagę oryginalność zaproponowanych rozwiązań, dorobek publikacyjny i dojrzałość naukową Kandydata wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.