Prof. dr hab. Henryk Figiel
Akademia Humanitas
w Sosnowcu

Kraków, 16 lipca 2024 r.

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Mateusza Buczkowskiego

pod tytułem **Komputerowe metody analizy i przetwarzania obrazów medycznych**

przygotowanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Khalid Saeed

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (z późn. zm.)

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólna wiedzę teoretyczna Doktoranta w dyscyplinie nauki fizyczne;
2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Buczkowskiego mieści się w nurcie bardzo aktualnych i szeroko rozwijanych metod numerycznej analizy i przetwarzania obrazów z różnych technik obrazowań, w szczególności dla potrzeb medycznych.

Praca jest bardzo obszerna, liczy 162 strony i zawiera 8 rozdziałów. Bogata jest też lista referencji dobrze dobranych i licząca 97 pozycji. Praca jest napisana jasno i zrozumiale z dużą dbałością o szczegóły i o stronę edytorską pracy.

Pracę rozpoczyna Wprowadzenie, które zawiera sformułowanie celów i tezy pracy oraz omówienie struktury rozprawy. Część teoretyczna obejmuje rozdziały 2 do 4, cześć doświadczalna rozdziały 5 do 7, a w rozdziale 8 przedstawione są wnioski końcowe.

Ocena wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie nauki fizyczne.

Doktorant w części teoretycznej swej pracy (rozdziały 2, 3, 4) przedstawia precyzyjnie i jasno podstawowe pojęcia i metody analizy numerycznej obrazów. Rozdział 2 zawiera wprowadzenie w zagadnienia cyfrowego przetwarzania obrazów, a w szczególności zapisu parametrów ilościowych obrazów oraz tworzenia histogramów. W obszernym rozdziale 3 autor omawia podstawy teoretyczne metod filtracji obrazów (filtr medianowy, uśredniający, bilateralny) i korekty tła, które zastosował w pracy. Rozdział 4 zawiera bardzo dobre omówienie metod segmentacji obrazów stosowanych przez autora w dalszej części pracy. W szczególności przedstawił przekształcenia morfologiczne, algorytmy korygujące intensywność pikseli, metody wykrywania krawędzi, a także obszernie omówił metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe. Z uwagi na swą specjalizację Doktorant bardzo trafnie dobrał i jasno omówił elementy wiedzy dotyczące metod komputerowych w fizyce, potrzebne do zrozumienia części eksperymentalnej pracy. Dowodzi to jego dużej i dogłębnej wiedzy w dziedzinie zastosowań technik numerycznych w analizie fizycznej i umiejętności jej zastosowania do konkretnych zagadnień fizycznych, a także znajomości technik fizycznych, z których były analizowane obrazy. Są to: mikro-tomografia komputerowa, mikroskopia optyczna i mikroskopia sił atomowych.

Ocena wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

W części eksperymentalnej w rozdziałach 5, 6 i 7 zaprezentowane są szczegółowo wyniki prac naukowych autora. Rozdział 5 stanowi prezentację i omówienie oryginalnego opracowania przez autora grupy algorytmów do segmentacji i analizy obrazów z mikro-tomografii komputerowej. Zostało to opublikowane w trzech publikacjach w czasopismach anglojęzycznych o zasięgu międzynarodowym [14, 38, 39], w których Doktorant jest pierwszym autorem. Podobnie, rozdział 6 dotyczy zastosowania oryginalnego, opracowanego przez autora zestawu algorytmów do segmentacji obrazów erytrocytów z klasycznego mikroskopu elektronowego w celu ilościowej analizy ich parametrów. Wyniki zostały też opublikowane w czasopiśmie międzynarodowym [50], gdzie Doktorant jest też pierwszym autorem. Rozdział 7 zawiera wyniki oryginalnych prac autora dotyczące zastosowania odpowiednio dobranych algorytmów do analizy uzyskanych z mikroskopu sił atomowych obrazów erytrocytów, co nie zostało jeszcze opublikowane.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie i syntetycznie przedstawione konkluzje autora powiązane z jego dywagacjami dotyczącymi przyszłości i rozwoju metod analizy numerycznej obrazów.

W odniesieniu do istotnych dla pracy rozdziałów 5, 6 i 7, które zawierają prezentację wyników badań i ich interpretacje, przedstawiam tutaj szerzej moje uwagi i komentarze.

Zagadnienie, które leży podstaw problemu omawianego w rozdziale 5 jest związane z małą różnicą kontrastu faz składowych materiałów porowatych będących obiektem obrazowania. W efekcie obrazy są zaszumione o małym kontraście, a fazy są trudno rozróżnialne. Dlatego celem prac autora było opracowania algorytmów umożliwiających segmentację obrazów możliwie najlepiej odpowiadającą dwufazowej strukturze obrazowanych próbek. Chcąc uzyskać jak najlepsze wyniki autor zastosował kombinację standartowych algorytmów eliminujących szumy, zwiększających kontrast i algorytmów

wyszukiwania krawędzi. W celu optymalizacji procesu segmentacji autor wygenerował sztuczne obrazy struktury, na których testował różne warianty algorytmów przy zróżnicowanych poziomach szumów. W efekcie tak zoptymalizowany pakiet algorytmów dał oczekiwany wynik segmentacji złożonych struktur. Stopień złożoności algorytmu opracowanego przez autora dobrze ilustruje diagram przepływu (rys. 5.9). Ta procedura jest, jak autor pisze, dosyć czasochłonna. Jednak, jak autor zaznacza, z uwagi na cel zastosowania proponowanego pakietu algorytmów do analizy obrazów w skali mikro nie wymagającej wyników w czasie rzeczywistym rejestracji obrazu, opracowanie tej procedury jest ze wszech miar uzasadnione i pożyteczne.

Ciekawe, jaka byłaby różnica czasowa pomiędzy np. procedurą tylko z filtracją szumu i prostą segmentacją a procedurą autora?

Zagadnieniem będącym motywacją opracowania przez autora analizy obrazów z mikroskopu optycznego (rozdz. 6) był problem szybkiego i pełnego opisu parametrów geometrycznych i ilościowych obrazowanych erytrocytów. Autor zastosował tu algorytm segmentacji z uwzględnieniem skali szarości. W algorytmie uwzględniono też problem stykania się erytrocytów na obrazie, eliminację szumów oraz niejednorodność tła. Autor szczegółowo opisał opracowany algorytm, a co jest istotne uwzględnił w algorytmie indywidualne przetwarzanie i segmentacje obrazów, co rozbudowało algorytm, ale zwiększyło precyzję analizy numerycznej, w szczególności wyznaczania parametrów geometrycznych (kontur, oś długa i krótka) erytrocytów. Poprawność analizy podniesiona została poprzez wykorzystanie metodyki sieci neuronowych i modelu głębokiego uczenia umożliwiając korekty rozkładów statystycznych rozmiarów erytrocytów. W celu przetestowania algorytmu autor stworzył obrazy testowe, które poddał analizie przy jego pomocy, co bardzo dobrze potwierdziło poprawność działania opracowanego algorytmu.

W odniesieniu do przedstawionej analizy obrazów z mikroskopu optycznego chciałbym jeszcze spytać, czy z uwagi na małe rozmiary erytrocytów i ich niewielkie odległości mogły występować w obrazach efekty dyfrakcyjne, gdyż mogłyby to wpływać na parametryzację erytrocytów? Można to przypuszczać analizując profile intensywności w przykładowym histogramie przedstawionym w pracy (rys. 6.2).

Przedstawiona w rozdziale 7 analiza obrazów powierzchni zawierającej erytrocyty uzyskanych ze skanowania w mikroskopie sił atomowych jest bardzo interesująca. Zastosowana metodyka analizy obrazów składała się z kilku kroków bez ich szczegółowego omówienia, jak to miało miejsce w analizach przedstawionych w rozdziałach 5 i 6. Aby uwydatnić strukturę powierzchni na obrazach autor zastosował maski wyostrzające, odejmowanie tła i adaptacyjne wyrównanie histogramu (Rys. 7.3), a w celu uwydatnienia struktury powierzchni wyjściowe obrazy filtrowano częstotliwościowo oraz filtrem binarnym, a następnie odejmowano od poprzednio uzyskanych obrazów z uwydatnioną strukturą powierzchni. Na tak opracowanych obrazach ewidentnie widać więcej szczegółów tekstury powierzchni (Rys. 7.4 c, d). Pozwoliło to uwypuklić strukturę powierzchni erytrocytów, co było ważne dla zrozumienia ich morfologii, istotnego dla zespołu badającego te próbki erytrocytów.

Jednakże nasuwa się pytanie dotyczące przygotowania tej powierzchni do pomiarów, a także przy jakiej temperaturze wykonywano pomiary. Chodzi o to, czy erytrocyty były w miarę równomiernie rozmieszczone i czy nie odkształcały się i przemieszczały w trakcie

pomiaru. Autor pisze, że na obrazach są widoczne agregaty dwutlenku tytanu, brak jednak wyjaśnienia w jakim celu do próbek wprowadzono ten tlenek tytanu. Czy erytrocyty badane na mikroskopie optycznym też zawierały tlenek tytanu?

Rozdział 8 zawiera w podrozdziałach 8.1 i 8.2 syntetyczne podsumowanie i ogólne wnioski z całości wykonanych badań. Autor konkluduje i krótko omawia uzyskane wyniki słusznie zwracając uwagę, że zaproponowane przez niego pakiety analizy zawierają w sobie znane algorytmy, ale ich odpowiednie dobranie pozwoliło na stworzenie oryginalnych narzędzi do analiz uwzględniających specyfikę i pochodzenie obrazów oraz spełniających wymogi naukowych i merytorycznych celów rejestracji obrazów.

Oryginalny jest natomiast podrozdział 8.3 o charakterze eseju zawierający rozważania autora dotyczący przyszłości i rozwoju algorytmów do analizy i przetwarzania obrazów. Nie wnosi on nic nowego do merytorycznej zawartości pracy i stanowi jedynie dowód na dużą wiedzę autora i dobrą znajomość aktualnych zagadnień związanych z tą dziedziną nauki.

Ocena wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Autor we wstępie do pracy sprecyzował dwa cele naukowe – opracowanie skutecznych metod cyfrowego przetwarzania i analizy obrazów oraz połączenie różnych podejść w celu stworzenia algorytmów wykorzystujących ich łączne możliwości. Zaprezentowane w rozdziałach 5, 6 i 7 wyniki jego prac dają podstawę do stwierdzenia, że te cele zostały w pełni zrealizowane. Zaproponowane przez autora podejście do kombinacji algorytmów (rozdz. 5) pozwoliło na bardzo precyzyjną analizę i interpretację obrazów mikro-tomografii komputerowej nie uzyskiwalną innymi metodami. Dowodem wartości jego pracy są trzy prace opublikowane na ten temat [14, 38, 39]. Podobnie twórcze połączenie algorytmów obliczeniowych i segmentacji (rozdz. 6) pozwoliło stworzyć metodę analizy ilościowej dotyczącej rozkładu parametrów erytrocytów obrazowanych klasycznym mikroskopem optycznym. Wyniki te zostały też opublikowane [50]. Analiza taka może być stosowana do obrazów obiektów o podobnym charakterze, np. nanocząstek. Bardzo wartościowy i interesujący naukowo jest też opracowany przez autora nowatorski algorytm do analizy obrazów z mikroskopu sił atomowych (rozdz. 7), który uważam za bardzo ciekawy, gdyż pozwala na bardzo precyzyjną, wielowymiarową analizę powierzchni badanych mikro-obiektów.

Precyzyjna analiza obrazów przedstawiona przez autora dowodzi zatem dużej wiedzy i biegłości w operowaniu złożonymi algorytmami analizy obrazów i fachowości Doktoranta.

Uwagi krytyczne

Praca jest wartościowa naukowo, niemniej zwracają uwagę pewne niedociągnięcia wskazane poniżej:

- Brak w pracy streszczenia po polsku i angielsku.

- We Wprowadzeniu wśród technik obrazowania stosowanych w medycynie autor „zapomniał" wymienić obrazowania magnetyczno-rezonansowego oraz PET (obrazowanie przy zastosowaniu pozytonów), dających wiele cennych informacji diagnostycznych niemożliwych do uzyskania techniką tomografii komputerowej. Obrazy z tych technik często są analizowane przy zastosowaniu np. segmentacji i doświadczenie autora mogłoby tu zostać skutecznie spożytkowane.

- usterki redakcyjne:

- rozmieszczenie rysunków w zbyt dużej odległości od miejsca, w którym są omawiane w tekście,

- niewłaściwie dobrany kontrast obrazów (np. rys. 5.2), co wynika z nie uwzględnienia różnicy kontrastu na ekranie komputera i w druku.

3. **Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę dużą wiedzę doktoranta w zakresie implementacji technik numerycznego opracowywania obrazów w zakresie fizyki i zastosowań medycznych, oryginalne i nowe zestawy algorytmów do analizy obrazów zaprezentowane w pracy składające się na wysoki poziom naukowy doktoratu, niejasności, których dotyczą pytania oraz przedstawione uwagi krytyczne wskazujące drobne niedoskonałości, pragnę stwierdzić, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Mateusza Buczkowskiego zawiera oryginalne i twórcze opracowania autora dotyczące analizy numerycznej i segmentacji medycznych obrazów mikroskopowych.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Hijel