

Lublin, 2011-03-12

Prof. dr hab. Paweł Mikołajczak
Dyrektor Instytutu Informatyki
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki
Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej
20-031 Lublin, Plac M. Curie-Skłodowskiej 1
Tel. (81) 537-62-62, e-mail:mikfiz@goblin.umcs.lublin.pl



Recenzja rozprawy doktorskiej

Przedmiotem mojej recenzji jest rozprawa doktorska pana magistra Jakuba Smołki zatytułowana „*Adaptacyjny system wspomagający usuwanie nadsegmentacji w obrazach poddanych transformacji wododziałowej*”. Promotorem rozprawy jest dr hab. Stanisław Grzegórski, profesor Politechniki Lubelskiej, a przewód doktorski prowadzony jest przez Radę Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Recenzję przygotowano na podstawie uchwały Rady Wydziału z dnia 14 grudnia 2010 roku oraz wynikającego z tej uchwały zlecenia Dziekana Wydziału, Pana Profesora dr hab. inż. Zdzisława Dudy (pismo z dnia 23 grudnia 2010 roku). Recenzję przygotowałem zgodnie z zaleceniami odpowiedniej Ustawy (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dziennik Ustaw Nr 65, poz.595), oraz zgodnie ze wzorem nadesłanym mi przez Pana Dziekana.

Tytuł rozprawy : *Adaptacyjny system wspomagający usuwanie nadsegmentacji w obrazach poddanych transformacji wododziałowej*
Autor rozprawy : mgr Jakub Smołka
Promotor rozprawy: dr hab. Stanisław Grzegórski, profesor Politechniki Lubelskiej

• Syntetyczne przedstawienie

● *Cel, zakres i charakter rozprawy*

Celem opiniowanej pracy doktorskiej pana mgr J. Smołki było (jak sam pisze na str. 2) „*stworzenie adaptacyjnego systemu umożliwiającego redukcję nadsegmentacji przy użyciu metody opartej na analizie skupień*”.

Mówiąc wprost, celem autora rozprawy było ulepszenie znanej metody segmentacji obiektów w obrazach cyfrowych jaką jest metoda wododziałowa. Jest to dość ciekawa i sprytna metoda segmentacji obszarów w obrazie cyfrowym, w praktyce daje niezbyt dobre wyniki ze względu na występowanie zjawiska tzw. nadsegmentacji, co oznacza nadmierne wydzielenie rozłącznych obszarów (co szczególnie powoduje produkowanie dużej ilości takich obszarów podczas przetwarzania niektórych typów obrazów, np. CT i MRI)). Jak pisze autor, jego celem było także zaimplementowanie opracowanej przez siebie metody, niestety poza ładnymi ale w większości nieczytelnymi wynikami segmentacji wybranych obrazów i dość schematycznych algorytmów autor rozprawy nie pokazał zrzutów z ekranu aplikacji ani nie dostarczył mi działającego programu czy programu typu demo.

Zaprezentowane wyniki segmentacji jak i oszacowania błędów segmentacji dokumentują uzyskanie przez doktoranta bardzo dobrych wyników zaproponowaną przez siebie metodą.

| | |
|----------------|-------------------------|
| Biuro Dziekana | |
| RAU | Wniosek dnia 17.03.2011 |
| | Nr 575 / zał. |

Zakres wykonanych w ramach rozprawy doktorskiej badań jest imponujący, trudno wskazać metodę, którą by autor nie implementował, szeroko czerpiąc z rozwiązań znanych z literatury – od prostych metod progowania do metod falkowych.

Rozprawa ma charakter aplikacyjny – autor w celu uzyskania segmentacji w obrazach cyfrowych konstruował złożone techniki postępowania, aby usunąć nadsegmentację, która jest typowym problemem metody wododziałowej i pokazać, że ta technika daje dobre wyniki i może być konkurentem dla klasycznych technik takich jak np. popularna metoda segmentacji przy pomocy wzrostu obszarów.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa liczy sobie 156 stron, zawiera siedem rozdziałów, bogatą bibliografię i dodatki. Rozdział drugi (ponad 40 stron) zawiera omówienie metody segmentacji wododziałowej, algorytmów i wad metody na podstawie literatury. Jest to bardzo szczegółowy i nużący fragment pracy. Oryginalne osiągnięcia autora rozprawy przedstawione są w rozdziałach 3,4,5 i 6. Rozdział siódmy zawiera podsumowania. Obszerna bibliografia (129 pozycji, cytowane prace były publikowane do 2009 roku) zawiera także prace, których współautorem był doktorant (11 pozycji, lata 2003 -2009).

Rozdział trzeci omawia zagadnienia związane z redukcją nadsegmentacji. Autor rozprawy proponuje sekwencje przekształceń, które prowadzą do redukcji nadsegmentacji. Technika postępowania składa się z dwóch kroków – wstępnej segmentacji a potem ostateczna redukcja przy użyciu metod analizy skupień. Wstępny krok, opisany w rozdziale 3.2 (schemat pokazano na rys. 3.1) omawia zastosowane metody przetwarzania obrazu (filtry i tworzenie obrazu gradientowego), wprowadza pierwotnie klasyczną segmentację wododziałową i kończy się usuwaniem nadsegmentacji poprzez łączenie płytkich zlewisk. Jak stwierdza autor (i jak można było się spodziewać) obrazy wykazują nadsegmentację. Na tym etapie przetwarzania autor wykorzystuje koncepcje i algorytmy znane z literatury, jego oryginalnym osiągnięciem jest implementacja wykorzystanych algorytmów. Niestety nic nie pisze o technicznej stronie implementacji (jaki np. język programowania, jaka platforma, jakie środowisko, jakie biblioteki). W rozdziale pokazane są tylko skromne efekty przetwarzania dwóch obrazów – „kwiatek_3” i „sufit_3”. Głównym efektem zaproponowanego przez doktoranta rozwiązania jest redukcja nadsegmentacji z początkowych około 10000 do około 3500 zlewisk (pierwszy etap) i dalej do około 2000 zlewisk (etap łączenia płytkich zlewisk). Redukcja jest znaczna, dalej występuje jednak nadsegmentacja, ale metoda działa bardzo dobrze, ponieważ nie doszło do łączenia regionów należących do różnych klas. W zaistniałej sytuacji doktorant proponuje w kolejnym kroku przetwarzania redukcję nadsegmentacji z zastosowaniem analizy skupień. Ten etap rozprawy jest opisany w rozdziale 3.3., opiera się na metodzie opisanej w artykule opublikowanym przez doktoranta w 2007 roku (J. Smółka, Hierarchical cluster analysis methods applied to image segmentation by watershed merging, *Annales Informatica*, A1, 6, pp. 73-84, 2007). Redukcja nadsegmentacji odbywa się w trzech krokach:

- Obliczenie atrybutów zlewisk
- Przeprowadzenie analizy skupień
- Utworzenie tablicy LUT , dzięki czemu można wykonać szybkie łączenie zlewisk

Wybór atrybutów może być dowolny, rekomendowane atrybuty to: rozmiar zlewiska, średnia, wariancja i odchylenie standardowe zlewiska, minimalna i maksymalna wartość oraz rozstęp zlewiska. Szczegółowy schemat stosowania analizy skupień pokazano na rys. 3.9 a opis procesu klasteryzacji zlewisk przedstawia algorytm 3.4. Tak przygotowany obraz poddawany jest kolejnym przekształceniom w celu wykonania ostatecznego połączenia zlewisk. Schemat postępowania doktorant przedstawił na rys 3.10. Na tym etapie tworzona jest tablica LUT

oraz następuje ostateczny wybór klas i ich liczby. Rysunek 3.12 pokazuje wynik silnej redukcji nadsegmentacji wykorzystującej analizę skupień. Należy zauważyć (pomimo mikroskopijnych ilustracji), że wyniki jakie uzyskał doktorant są imponujące.

Rozdział czwarty rozprawy chociaż nazywa się „Dobór parametrów analizy skupień” omawia także zagadnienia związane z oszacowaniem i miarami jakości segmentacji. Ocena jakości segmentacji nie jest łatwym zadaniem – nie istnieje tzw. *golden standard*. Istnieje wiele proponowanych w literaturze metod oceny jakości segmentacji. Doktorant cytuje podział metod według H. Zhanga.

W tym rozdziale autor stwierdza, że w metodach, które pozwalają zmieniać parametry, jakość segmentacji zależy od wyboru tych parametrów. Jest to oczywiste, w metodzie segmentacji zaproponowanej przez autora można zmieniać metody klasteryzacji, miary podobieństwa, zestawy atrybutów. W tej sytuacji doktorant zbadał wpływ parametrów na jakości i omówił otrzymane wyniki. Doktorant wybrał zestaw 12 atrybutów zlewisk (str. 82) takich jak między innymi wartość średnia i odchylenie standardowe, wartość średnia oraz wariancja czy wartość średnia i wartość minimalna. Ponieważ algorytmy grupowania takie jak SLINK, CLINK czy UPGMA wymagają współczynnika, który pozwoli na określenie podobieństwa obiektów, doktorant dodatkowo wybrał i zbadał wpływ siedmiu współczynników takich jak np. odległość euklidesowa, współczynnik różnicy kształtu czy współczynnik korelacji liniowej. Te wszystkie kombinacje atrybutów i współczynników testowano na zestawie 4 obrazów medycznych CT i MRI (typ T1, T2 i PD), obrazy pochodzą z biblioteki VTK. Wyniki doktorant przedstawił w tabeli 4.1. Na stronach 87 i 88 doktorant przedstawił obrazy segmentacji. W podsumowaniu uzyskanych wyników doktorant stwierdza, że najlepszy zestaw atrybutów to średnia i odchylenie standardowe, ale dalej wylicza siedem zestawów atrybutów, które też dają niezłe wyniki. Rozdział czwarty zawiera też analizę jakości segmentacji wykonanej dla obrazów barwnych.

W **rozdziale piątym** autor opisuje techniki podjęte w celu poprawy wydajności zaproponowanej przez siebie metody segmentacji. Według doktoranta, praktycznie wymaga się, aby proces przetwarzania obrazu nie trwał dłużej niż 20 sekund, jego program, jak mogę się domyślać, w tym czasie potrafi wysegmentować 2000 zlewisk, co wypełnia założony limit czasu. W celu przyspieszenia czasów przetwarzania obrazów, autor zaimplementował metodę opublikowaną przez Junga („Combining wavelets and watersheds for robust multiscale image segmentation, 2007 rok). Technika wykorzystuje transformatę falkową oraz sekwencyjne przetwarzanie obrazów o malejącej rozdzielczości (piramida obrazów). Zmniejszanie rozdzielczości nie jest problemem – problemem jest przywracanie oryginalnej rozdzielczości. Schematy przetwarzania obrazów metodami transformacji falkowej pokazano na rysunku 5.4, algorytm opisano na stronie 109. Wyniki segmentacji doktorant testował na pięciu barwnych obrazach o rozdzielczości 512x512 pikseli. W tabeli 5.1 pokazano całkowite czasy segmentacji wykonywanych wybranymi technikami oraz przyspieszenia jakie uzyskano wykorzystując transformację falkową. Maksymalne przyspieszenie wynosiło 358 razy.

W **rozdziale szóstym** autor przedstawia opracowany przez siebie adaptacyjny system wspomagający usuwanie nadsegmentacji, łącznie z ręczną korektą procesu. Wydaje się, że w tym rozdziale doktorant opisuje funkcjonalność swojej aplikacji. Niestety, nie dysponując programem demonstracyjnym, trudno mi jest zorientować się, jakie opcje ręcznej (albo jak chce doktorant interakcyjnej) korekcji nadsegmentacji są dostępne oraz jakie są otrzymywane efekty. Zamieszczone w znacznej ilości niewielkie rysunki wyjaśniają bardzo mało.

W **rozdziale siódmym** doktorant podsumowuje swoje osiągnięcia. Cel postawiony w pracy został osiągnięty. Co prawda znaczną ilość swojego czasu, jak się zorientowałem, doktorant poświęcił na potwierdzenie znanego od kilkunastu lat faktowi, że segmentacja wododziałowa w czystej postaci prowadzi do kolosalnej nadsegmentacji.

Stosując wyrafinowane techniki i algorytmy, bazując na wielu koncepcjach znanych z teorii (np. transformacje falkowe, analiza skupień, histogramy, statystyczne deskryptory obrazu, elementy teorii informacji takie jak entropia czy informacja wzajemna) doktorant zaprojektował i zaimplementował program, który wykonuje segmentację obszarów o dużej dokładności. W trakcie przygotowywania doktoratu, mgr Jakub Smolka wykonał olbrzymią pracę analizując setki tysięcy obrazów (str. 130). Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów komputerowych doktorant przedstawia w podsumowaniu trzy wnioski:

- Analiza skupień redukuje znacznie nadsegmentację i daje dobre wyniki
- Zastosowanie transformaty falkowej przyspiesza proces segmentacji
- Opracowana metodologia jest bardzo uniwersalna, nadaje się do wszystkich typów obrazów

• **Opinia**

1. *Poprawność i oryginalność postawionej tezy i stopniu w jakim została ona wykazana*

Doktorant w rozprawie sformułował trzy tezy (str.2):

- Za pomocą metody wododziałowej opartej na analizie skupień można skutecznie zmniejszyć nadsegmentację w obrazach poddanych transformacji wododziałowej.
- Proces segmentacji obrazu, za pomocą proponowanego rozwiązania, można przyspieszyć przy użyciu transformaty falkowej.
- Metoda redukcji nadsegmentacji oparta na analizie skupień może być dostosowana do różnych zadań

W swojej rozprawie doktorant **wykazał prawdziwość** postawionych tez. Jakość segmentacji, jaką można uzyskać proponowaną przez doktoranta techniką jest bardzo dobra. Zastosowana metodologia jest poprawna, metoda jest rzetelnie udokumentowana.

2. *Analiza źródeł (w tym literatury światowej i/lub stanu techniki) świadczącej o dostatecznej wiedzy autor w danej dyscyplinie naukowej*

Przegląd naukowej literatury poświęconej segmentacji obrazów cyfrowych jest bardzo dobra, obejmuje dość duży przedział czasu (2002 – 2009) i jest kompletny. Doktorant doskonale zna zagadnienia związane z przetwarzaniem obrazów cyfrowych, zaawansowane metody teorii i praktyki informatyki i doskonale operuje zaawansowanym aparatem matematycznym.

3. *Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy lub/i stanu techniki reprezentowanej przez literaturę światową*

Rozprawa prezentuje bardzo dobry poziom w zakresie omawianych technik przetwarzania obrazów cyfrowych, stosuje najnowsze osiągnięcia w tym przedmiocie. Uzyskane wyniki należą, według mojej opinii do jednych z najlepszych, jakie można znaleźć w literaturze przedmiotu. Jeżeli chodzi o istniejące obecnie rozwiązania techniczne, to nie umniejszając w niczym osiągnięć doktoranta, obecnie w metodach przetwarzania obrazów cyfrowych dokonuje się rewolucja spowodowana niebywałym rozwojem procesorów graficznych (GPU). Dzięki obliczeniom równoległym, procesorom wielordzeniowym, technologii CUDA i biblioteki takiej jak np. OpenCL można łatwo osiągać stukrotne przyspieszenia czasu wykonywania wielu algorytmów.

4. *Znaczenie uzyskanych wyników dla danej dyscypliny naukowej*

Doktorant wykonał mrówczą pracę analizując rozliczne aspekty technik przetwarzania obrazów. Za cenne uważam wyniki uzyskane przez doktoranta podczas procesu segmentacji obrazów medycznych CT i MRI. Doktorant ustalił, jakie parametry procesu segmentacji wododziałowej dają najlepsze wyniki. Pokazał, że np. dla obrazów CT najlepsze jest wykorzystanie minimalnej wariancji Warda oraz metody średniego wiązania (UPGMA).

Takich ustaleń można w doktoracie znaleźć znacznie więcej, pomagają one tworzyć wydajne aplikacje medyczne.

Jeszcze jedna rzecz jest cenna w rozprawie doktorskiej pana mgr Jakuba Smołki. Segmentacja wododziałów nie była popularną techniką segmentacji stosowaną w przetwarzaniu obrazów medycznych. Osiągnięcia doktoranta skłaniają do rewizji utartych poglądów. Metoda segmentacji wododziałowej w świetle prac doktoranta daje dobre wyniki i może być stosowana praktycznie.

5. Umiejętności autora do poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność redakcyjna rozprawy)

Autor poprawnie przedstawia uzyskane przez siebie wyniki, widać jak olbrzymią pracę w trakcie przygotowywania rozprawy wykonał autor. Niestety zwięzłość i jasność redakcyjna nie jest mocną stroną pana mgr Jakuba Smołki. Mogę powiedzieć, że czytanie rozprawy przez informatyków nie zajmujących się bezpośrednio segmentacją, może być zajęciem bardzo pracochłonnym i wymagać zaznajomienia się ze specjalistyczną literaturą przedmiotu.

• Wskazanie głównych wad rozprawy, jej słabych stron wraz z krytycznymi uwagami szczegółowymi

Obowiązkiem recenzenta jest zgłoszenie uwag krytycznych. Niektóre z nich pojawiły się już wcześniej. Niżej przedstawione będą kolejne uwagi polemiczne nie mające żadnego istotnego wpływu na merytoryczną ocenę rozprawy, która jest pozytywna.

Do błędów redakcyjnych pracy zaliczam przeładowanie jej treści informacjami literaturowymi, niektórymi bardzo podstawowymi, i niewiele wnoszącymi do meritum omawianej właśnie rozprawy. Takie informacje są w całym rozdziale 1. Wiele podanych w tym rozdziale wiadomości jest omawianych w klasycznych skryptach akademickich, rozdział można by skrócić co najmniej o połowę. W rozdziale 1 i 4 opisał doktorant różne miary jakości segmentacji, podał kilkanaście formuł. W swoich eksperymentach do opisu jakości segmentacji używa dwóch czy trzech. W tym miejscu wystarczyłoby np. powołać się na monografię pod redakcją W. Skarbka „Multimedia, algorytmy i standardy kompresji”, PLJ, Warszawa, 1998, gdzie w 4 rozdziale opisano 17 miar jakości. Rozbudowane rozdziały rozprawy świadczą o talentach dydaktycznych doktoranta, ale w kontekście głównego celu pracy doktorskiej, jakim jest zebranie i zaprezentowanie własnego oryginalnego dorobku naukowego, mają małe znaczenie.

Jak już wspomniałem prezentacja uzyskanych wyników nie zawsze jest klarowna. Długo się zastanawiałem co np. przedstawia tabela 4.1 – „Zestaw parametrów analizy skupień”(str. 84). Prawie na trzech stronach w 6 kolumnach pokazane są tajemnicze skróty. Ten pokaz pracowitości doktorant kończy stwierdzeniem : „wyniki przedstawione w tabeli 4.1. pozwalają stwierdzić, że optymalne parametry analizy skupień zależą od typu obrazu, w którym usuwa się nadsegmentację”. Myślę że nie wszystkie uzyskane wyniki zaraz muszą być publikowane, tak jak nie wszystkie wnioski trzeba publikować. Na stronie 89 autor omawiając optymalny zestaw atrybutów, podaje dość trywialne obserwacje. Pewne wnioski są zbyt ogólne. Na przykład doktorant stwierdza, że najlepsze segmentacje uzyskał za pomocą siedmiu zestawów atrybutów (na 12 zbadanych). Ilość informacji w tym stwierdzeniu jest niewielka.

Dużym utrudnieniem w interpretacji wyników jest umieszczanie bardzo małych obrazków (niewiele większych od znaczka pocztowego). Musimy wierzyć na słowo autorowi rozprawy, że pokazuje bardzo dobry wynik. Umieszczanie nieczytelnych obrazów w rozprawie poświęconej jakości segmentacji mija się z celem. Szczególnie małe obrazy CT i MRI , gdzie

w interpretacji ważne są stosunkowo małe obszary zainteresowania, nie pomagają ocenić jakość segmentacji.

Doktorant przedstawia wyniki segmentacji, niestety nic nie pisze o aplikacji. Domyślam się że używał jakiegoś pakietu do przetwarzania zdjęć cyfrowych. Nie wiem czy to była własna aplikacja, czy wykorzystano do eksperymentów znane pakiety takie jak np. Analize, VTK, Matlab czy ITK. Nie mam informacji jaki był system operacyjny, jaki procesor, jaka karta graficzna, jaka pamięć RAM. Trudno w takiej sytuacji wyrokować czy czasy przetwarzania są duże czy małe. Na stronie 111 w tabeli 5.1. pokazano porównanie całkowitych czasów segmentacji w zależności od liczby wykonanych kroków transformaty falkowej – miałem trudności z prawidłową interpretacją tej tabeli.

W rozdziale 6 zatytułowanym adaptacyjny system wspomagający usuwanie nadsegmentacji autor rozprawy przedstawia wszystkie etapy segmentacji. Aplikacja wymaga zbyt dużo wiedzy od użytkownika, należałoby sprecyzować dla kogo jest ona przeznaczona. Prezentowana metoda, jeżeli ma mieć zastosowania praktyczne nie może wymagać od użytkownika posiadania tytułu doktora nauk informatycznych.

Praca została bardzo skrupulatnie sprawdzona pod względem błędów drukarskich, mimo to udało mi się wychwycić jeden błąd drukarski na str. 39 – „waterfall alhoritm”.

• Sformułowanie i uzasadnienie wniosku

Wymienione wyżej usterki nie umniejszają w niczym merytorycznej wartości rozprawy. Moje uwagi, dość krytyczne, tracą na ostrości, gdy oceni się zakres prac wykonanych w ramach ocenianej rozprawy. Po zapoznaniu się z całością rozprawy mogę stwierdzić, że pan mgr Jakub Smółka zajmował się całą gamą niebanalnych problemów i poprawnie rozwiązał sformułowane zagadnienia przy użyciu właściwej metodologii naukowej. W trakcie prac uzyskał wyniki ciekawe, wartościowe i oryginalne.

Mimo rozwlekłej redakcji rozprawy doktorskiej oraz używania zbyt specjalistycznej terminologii (dla mnie nie jest to istotne, ponieważ zagadnieniem przetwarzania obrazów cyfrowych zajmuję się od ponad 20 lat, i doskonale znam tą tematykę, ale niespecjalista może mieć pewne kłopoty ze zrozumieniem niektórych elementów rozprawy), zdecydowanie pozytywnie oceniam to, co zrobiono dowodząc postawionej tezy.

Autor rozprawy wykazał się też pracowitością, o czym świadczy *współautorstwo 11 opublikowanych prac naukowych*, w tym 7 prac opublikowanych po angielsku w szanowanych czasopismach naukowych i międzynarodowych konferencjach.

Po szczegółowej ocenie pracy, stwierdzam, że zakres dokonań doktoranta odpowiada wymaganiom, jakie w tym zakresie stawia Ustawa o stopniach naukowych.

Wniosek końcowy

Mogę z całą odpowiedzialnością stwierdzić, że opiniowana praca pana mgr Jakuba Smółki zatytułowana „*Adaptacyjny system wspomagający usuwanie nadsegmentacji w obrazach poddanych transformacji wododziałowej*” spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, dlatego wnioskuję do Rady Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej o jej przyjęcie oraz o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do jej publicznej obrony.



Prof. Paweł Mikołajczak