

17 kwietnia 2018 roku

dr hab. inż. Leszek J Chmielewski, prof. SGGW
Wydział Zastosowań Informatyki i Matematyki
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

autor rozprawy:

mgr inż. Tomasz Woźniak
Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki
i Automatyki, Instytut Elektroniki

tytuł rozprawy:

**Zastosowanie metody zbiorów poziomicowych do segmentacji naczyń
krwionośnych w obrazach angiograficznych**

Recenzja została przygotowana na zlecenie Prodziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej, wykonującego uchwałę Rady tego Wydziału w związku z przewodem doktorskim Pana mgra inż. Tomasza Woźniaka. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Michał Strzelecki, prof. nadzw. Politechniki Łódzkiej.

1 Zawartość rozprawy

Rozprawa dotyczy przede wszystkim zagadnienia segmentacji drzew naczyń krwionośnych uzyskanych z metod angiograficznych. Zagadnienie jest istotne, ponieważ wiele częstych chorób układu krążenia diagnozuje się za pomocą metod z tej grupy, a uzyskiwane obrazy są złożone i trudne do automatycznej analizy, ponieważ zawierają dane dwu- lub trójwymiarowe, obrazowane obiekty są zarówno duże jak i bardzo drobne na jednym obrazie, oraz zawierają różnorodne zakłócenia. Analiza tych obrazów wymaga automatyzacji co najmniej z dwóch powodów: dla ułatwienia późniejszej analizy i interpretacji dokonywanej przez człowieka, oraz dla umożliwienia analizy ilościowej za pomocą odpowiednich algorytmów.

Rozprawa zawiera następujące rozdziały.

We wprowadzeniu Autor uzasadnia potrzebę podjęcia badań nad zagadnieniem segmentacji obrazów angiograficznych. Tu również znajduje się przegląd metod obrazowania angiograficznego oraz znanych metod filtracji i segmentacji obrazów pochodzących z tej metody. W tym rozdziale przedstawiono także cele i tezę pracy.

W drugim rozdziale najpierw opisano obrazy testowe, które zostaną użyte w dalszych częściach pracy. Dalej podano ogólny, krótki opis procesu segmentacji. Omówiono metody przetwarzania wstępnego, oraz szerzej metody filtracji oraz te metody segmentacji, które zostały wytypowane do wykorzystania w pracy, oraz propozycje ich rozszerzeń, stanowiące własny wkład Autora. Również tu pokazano sposoby implementacji algorytmów, w architekturze jednoprocessorowej, klasycznej wieloprocessorowej, oraz z użyciem procesora graficznego nVidia CUDA.

Wyniki testów zaimplementowanych metod przedstawiono w rozdziale trzecim. Analizowano kolejno syntetyczne obrazy drzew sieci naczyń krwionośnych (z analizą jakościową i ilościową), dwa rodzaje obrazów angiograficznych rezonansu magnetycznego: dłoni i mózgu (z analizą ilościową

i jakościową dla dłoni i tylko jakościową dla mózgu), oraz obrazy angiograficzne tomografii komputerowej mózgu (z analizą jakościową). Otrzymane wyniki przedyskutowano. Analizy jakościowe były przeprowadzone przez radiologów.

W czwartym i ostatnim rozdziale zawarto podsumowanie przeprowadzonych badań i sformułowano wnioski dotyczące spełnienia tezy pracy. Zasygnalizowano także kierunki dalszych badań.

Ponadto praca zawiera spis oznaczeń i bibliografię obejmującą 69 pozycji.

2 Teza i cele pracy

Teza pracy Zastosowanie zaproponowanej metody zbiorów poziomicowych wykorzystującej wieloskalową funkcję unaczynienia pozwala na detekcję naczyń krwionośnych o szerokim zakresie średnic dla analizowanych klas obrazów angiograficznych.

Cele pracy Jak podaje Autor w rozdziale 1.4, *Głównym celem (...) pracy jest opracowanie nowego algorytmu segmentacji sieci naczyń krwionośnych w obrazach angiograficznych RM oraz TK wykorzystującego metodę zbiorów poziomicowych. Metoda ta powinna umożliwiać segmentację naczyń w obrazach angiograficznych różnego typu.*

Wybór metody zbiorów poziomicowych został obszernie uzasadniony przez omówienie w przeglądzie znanych metod zawartym w rozdziale poprzedzającym (1.3).

Cel ten uzupełniają szczegółowe cele pomocnicze: testowanie i ocena ilościowa i jakościowa nowego algorytmu dla obrazów dwu- i trójwymiarowych, oraz przyspieszenie jego działania przez zastosowanie obliczeń równoległych.

3 Omówienie treści i wyników rozprawy

3.1 Zasadnicze osiągnięcia

Zasadnicze osiągnięcie opisane w pracy polega na modyfikacji, lub zmianie kompozycji, oraz własnym uzupełnieniu, metod segmentacji obrazu drzewa naczyń krwionośnych, z zakłóceniami, w taki sposób, aby następowało wysegmentowanie naczyń zarówno grubszych jak i cieńszych, w jednym algorytmie. Naczynia są traktowane jako obiekty wydłużone i ciągle.

Doktorant modyfikował metodę Forkerta [51], która polega na wykorzystaniu segmentacji metodą zbiorów poziomicowych (ang. *level set*, LS) z filtracją anizotropową, z zastosowaniem hesjanu. Metoda ta została wytypowana ze względu na jej wyjściowo dobre właściwości. Doktorant zastosował w niej trzy modyfikacje. 1° Zastąpiono wariacyjny model LS Forkerta [51] wersją Chana i Vese [42]. 2° Zamieniono funkcję unaczynienia według Sato [23] na funkcję unaczynienia Frangięgo [22]. 3° Zaproponowano zastosowanie algorytmu wieloskalowego, z metodą doboru skal opisaną w rozdziale 2.5.3.

Modyfikacje te są wynikiem analizy własności i działania wielu wersji metod segmentacji. Wybór zorganizowano według diagramu z rys. 6, str. 33, dla którego wszystkie kombinacje zostały zaimplementowane, a następnie przebadane (co opisano w rozdziale 3). Doboru kolejnych modyfikacji dokonano świadomie dążąc do uzyskania metody dobrze działającej dla rzeczywistych drzew naczyniowych. Na przykład, na końcu strony 47 podano uzasadnienie dla odrzucenia metody Bauera i Bischofa [57]

Uzyskany ostatecznie algorytm został zaimplementowany przede wszystkim w wersji jednowątkowej, a ze względu na jego długie działanie, również w wersji równoległej w klasycznej architekту-

rze wieloprocesorowej, a także w równoległej architekturze GPU nVidia CUDA, co jest zadaniem samym w sobie niebanalnym.

3.2 Inne uwagi pozytywne

Ważność dziedziny Dziedzina analizy obrazów biomedycznych, w tym angiograficznych, służy diagnostyce i leczeniu, i jako taka ma podstawowe znaczenie dla jakości życia człowieka.

Zwracanie większej uwagi na jakość wyników niż na czas obliczeń Autor słusznie poświęcił dużo czasu na przyspieszenie obliczeń, ale robił to bez upraszczających ingerencji w algorytmy. Wspomina o tym w rozdziale o celach i tezie pracy, gdzie nie rezygnuje z funkcjonalnie dobrych, ale czasochłonnych algorytmów zbiorów poziomicowych. Jest to bardzo słuszne, ze względu na nadal szybki rozwój sprzętu obliczeniowego, dzięki czemu coraz bardziej czasochłonne algorytmy stają się praktycznie stosowanymi.

Uwagi szczegółowe

1. **Dobre przeglądy stanu wiedzy** Autor dokonał przeglądu stanu zagadnienia obrazowania angiograficznego w zakresie dostosowanym do wymogów rozprawy doktorskiej (na podstawie ośmiu źródeł). Dokonał też dogłębnego przeglądu metod analizy obrazów angiograficznych, w tym filtracji i segmentacji, przy czym powołał się na dość dużą liczbę pozycji literatury (około 60), dla których podał swój komentarz, a w wybranych przypadkach dokonał reimplementacji opisanych metod. Przegląd ten można uznać za bardzo dobry.
2. **Testowanie wyników** Przeprowadzono liczne testy ilościowe, względem danych syntetycznych modelujących drzewo naczyń krwionośnych w mózgu, z typowymi artefaktami i zakłóceniami, dla których znana była podstawowa prawda (*ground truth*), oraz jakościowe testy na danych rzeczywistych przeprowadzone przez lekarzy.
3. **Jedna metoda do wielu zastosowań** Ta sama metoda jest z sukcesem stosowana do obrazów w kilku modalnościach, a nawet do obrazów dwu- i trójwymiarowych.
4. **Wzory w postaci jawnej** Algorytmy zapisano jawnymi, dość skomplikowanymi wzorami iteracyjnymi (a nie tylko proceduralnie), np. (42).
5. **Oprogramowanie tylko częściowo zintegrowane** Zupełnie nie przeszkadza mi to, że oprogramowanie nie zostało całkowicie zintegrowane, lecz niektóre fragmenty obliczeń są wykonywane w różnych środowiskach (opis na str. 62-63). Na etapie pracy badawczej szkoda czasu na zadania z dziedziny inżynierii oprogramowania, podczas gdy ważne są tylko osiągnięcia badawcze.

3.3 Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Zasadniczo, moje uwagi mają charakter bardziej dyskusyjny niż krytyczny i są drugorzędne względem zasadniczych osiągnięć omówionych w pracy. Nie podważają one mojej pozytywnej opinii o pracy, którą podaję w podsumowaniu.

3.3.1 Uwagi o charakterze ogólnym

1. **Jakościowa analiza dokonana przez radiologów** Nie odnalazłem w pracy informacji o cechach grupy zaangażowanych radiologów: liczbie osób i ich doświadczeniu. Brak informacji o ewentualnej zgodności lub rozbieżności ich ocen. Jak wiadomo, oceny dokonane przez człowieka mają charakter przede wszystkim jakościowy i charakteryzują się pewnym zakresem arbitralności.
2. **Ręczny dobór parametrów** Niektóre parametry, na przykład waga składnika dla długości konturu μ , są dobierane indywidualnie dla każdego obrazu. Nie podano wskazówek co do doboru wartości tej wagi, podczas gdy, w świetle opisu na dole strony 55, parametr ten jest ważny. Nie podano też wartości ani wskazówek dla parametru ω^V sterującego rozrostem obszaru wzdłuż naczynia krwionośnego. Z drugiej strony, wartość drugorzędowego parametru regularyzacyjnego η jest podana.
3. **Rozłączanie drzewa** Zdarzają się przypadki rozłączania drzewa, szczególnie w rozgałęzieniach (np. rys. 19d). Czy nie jest to słabością wszystkich metod, w których analizę prowadzi się przy założeniu, że brzegi poszukiwanych obiektów są gładkie i prawie równoległe?
4. **Publikacje** Autor powołał się na jedną pracę z własnym udziałem w zakresie omawianej tematyki, w stałej serii *Lecture Notes in Computer Science*, regularnie indeksowanej w ważnych serwisach literaturowych. Doktorant jest w niej drugim autorem. Dorobek publikacyjny należy więc uznać za skromny.

3.3.2 Szczegółowe uwagi redakcyjne i językowe

Styl pracy nie dobiega od stanu typowego w dziedzinie. Poniższe uwagi zostaną prawie w całości pominięte w czasie czytania recenzji podczas obrony pracy. Chcę jednak zwrócić na nie uwagę Autora, szczególnie na te, które się powtarzają. Są to głównie błędy tłumaczenia, składni, interpunkcji, stylu, i drobne pomyłki.

1. **S. 10, 11:** Protokół angio-TK nie jest nieinwazyjny. Nie wymaga kontrastu, lecz wymaga wystawienia na promieniowanie RTG. Podobnie, techniki ToF i PC nie są nieinwazyjne, lecz niskoinwazyjne.
2. **S. 9:** Nie *nieprzepuszczalny przez promienie* lecz *nieprzepuszczalny dla promieni*.
3. **S. 9, 10 i dalsze:** Brak przecinków przed takimi słowami, jak *z czego, który*.
4. **S. 12:** Nie *Weinera* lecz *Wienera*.
5. **S. 12:** Nie *na podstawie wartości jasności jego bezpośrednich sąsiadów* lecz *na podstawie wartości jasności jego samego i jego bezpośrednich sąsiadów*.
6. **S. 13:** Macierz Hessego raz jest nieprawidłowo określona jako *Hessjan*, zaś dalej prawidłowo *hesjan*.
7. **S. 13 i dalsze:** Antropomorfizacje: *jednoskalowe filtracje (...) mają problem, filtracja dobrze radzi sobie, filtr bilateralny potrafi (...), lecz ma problemy z (...), metoda nie radzi sobie dobrze, techniki starały się*. Nie jest to poważny błąd, a czasem wcale nie jest błędem napisanie np. że *rozdział podsumowuje*, ale przy dużym zagęszczeniu takich sformułowań może to zwracać uwagę.
8. **S. 13:** Nie *ekspotencjalną* lecz *eksponencjalną*.

9. **S. 14:** Nie *okwizycji* lecz *akwizycji*.
10. **S. 14:** Teksty po angielsku nie we wszystkich wystąpieniach są napisane kursywą, np. w omówieniu *przekształcenia stabilizującego wariancję VST* (ang. variance-stabilizing transformation).
11. **S. 20:** Tłumaczenie terminu *expectation maximization method* to raczej, w bezpośrednim tłumaczeniu, *metoda maksymalizacji oczekiwań*, nazywana raczej *metodą największej wiarygodności*, a w każdym razie nie *oczekiwania-maksymalizacji*. Występuje też błąd literowy: nie *expection* lecz *expectation*.
12. **S. 23, Tab. 3:** Skrót MZP, oznaczający oczywiście podstawową dla rozprawy *metodę zbiorów poziomicowych*, nie został nigdzie wprowadzony.
13. **S. 25:** To nie cele, lecz spodziewane powodzenie w ich realizacji pozwala postawić tezę pracy.
14. **S. 31:** Błąd typograficzny typu *wdowa*: pojedynczy krótki wyraz, w tym przypadku samotna cyfra 5, w ostatnim wierszu na stronie.
15. **S. 41, między (10) a (11) i dalej:** Nie *w momencie*, lecz *w przypadku*.
16. **S. 44, przed równaniem (16):** Równanie (16) powstało przez scałkowanie (14), a nie (15).
17. **S. 52-53, wyprowadzenia:** To, czy przekształcenia i wzory podane na tych stronach pochodzą z literatury, czy są własnym dorobkiem Autora, dowiadujemy się dopiero ze żmudnej analizy literatury (nie są).
18. **S. 52, wzory (29), (30):** Stałe c_1, c_2 mylą się ze zmiennym a_1, a_2 .
19. **S. 52, wzór (31):** To raczej gładkie przybliżenie funkcji Heaviside'a, a nie definicja.
20. **S. 79, rys. 30:** Co oznacza zielony okrąg dowiadujemy się dopiero na str. 88, a w podpisie rysunku nie ma o tym wzmianki.
21. **S. 89 dół:** Falszywa krawędź powstała w wyniku maskowania obszaru kości nie powinna być wykrywana. Należałoby wykorzystać informację o położeniu brzegu maski do wykluczenia jego otoczenia z obszaru, w którym prowadzona jest detekcja brzegów.
22. **S. 98, literatura, poz. [44]:** Brak tytułu pracy.
23. **S. 98, literatura, poz. [44]:** Brak tytułu pracy.
24. **S. 100, literatura, poz. [66]:** Od informacji o konferencji ważniejsza jest informacja o tomie LNCS i stronicach, której zabrakło. Dobry opis tej pozycji jest tym bardziej ważny, że jest to jedyna praca Doktoranta cytowana w jego rozprawie.

3.4 Uwaga na marginesie

Na marginesie tej analizy chciałbym zaznaczyć, że zajmowałem się zagadnieniem podobnym, lecz bez jakiegokolwiek wzmianki o obrazach angiograficznych. Zapewne dlatego Doktorant nie natrafił w literaturze na żaden ślad moich prac. Zaproponowana przeze mnie akumulacyjna, nieparametryczna i rozmyta metoda detekcji obiektów wydłużonych była stosowana do wykrywania naczyń krwionośnych i przewodów mlecznych w mammogramach. W detekcji tych obiektów zmagalem się z problemem zmiennej skali oraz nieprawidłową detekcją samych tylko brzegów grubych naczyń (jak na rys. 19 w recenzowanej rozprawie). Stosowałem też podobne kryterium wyboru wyniku dla wielu skal, jak we wzorach (13), (48) w recenzowanej rozprawie. Metody stosowane przeze

mnie, opisane między innymi w [Chm06, Chm15] były jednak zupełnie różne od proponowanych przez Doktoranta. Były to metody detekcji, a nie segmentacji. Nie były one testowane dla obrazów angiograficznych, między innymi dlatego, że jak dotąd nie mają sformułowań ani implementacji w trzech wymiarach. Zatem, nie podważa to oryginalności recenzowanej rozprawy.

4 Podsumowanie

Podsumowując, w rozprawie można wyróżnić znaczące elementy oryginalne. Zaproponowano oryginalną, bardzo dobrze uzasadnioną modyfikację wersji metody segmentacji obrazów angiograficznych. Wybór tej wersji został bardzo solidnie uzasadniony przez porównanie z innymi, konkurencyjnymi wariantami, które zostały zreimplementowane lub zaimplementowane przez Doktoranta. Całość została pozytywnie zweryfikowana na przykładach zaczerpniętych z praktyki medycznej.

5 Wniosek

Powyższy opis, uwzględniający tak zalety pracy jak i uwagi dyskusyjne i krytyczne, uzasadnia mój ostateczny wniosek, że recenzowana rozprawa **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Zagadnienie zostało prawidłowo postawione i skutecznie rozwiązane, a rozwiązanie rzetelnie zweryfikowane. Rozprawa **wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata** w przedmiotowej dyscyplinie naukowej **oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**.

Tym samym, rozprawa spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595; z późn. zmianami, tekst jednolity: Dz.U. 2017 poz. 1789).



Cytowana literatura

- [Chm06] L. J. Chmielewski. Fuzzy histograms, weak fuzzification and accumulation of periodic quantities. Application in two accumulation-based image processing methods. *Pattern Analysis & Applications*, 9(2-3):189–210, Oct 2006. doi:10.1007/s10044-006-0037-7.
- [Chm15] L. J. Chmielewski. *Metody akumulacji danych w analizie obrazów cyfrowych. Wydanie poprawione*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT Andrzej Lang, Warszawa, 2015. www.lchmiel.pl/akum06.