

Recenzja pracy doktorskiej mgr inżyniera Piotra Guta
"Optymalizacja metody nakładania obrazów binarnych, mało wrażliwej na błędy w danych"

Recenzowana praca dotyczy wykorzystania częściowej skierowanej miary odległości Hausdorffa do opracowania metody nakładania obrazów binarnych charakteryzującej się małą wrażliwością na błędy w danych. Praca ta jest napisana na 88 + 8 stronach i ma 6 rozdziałów. Na końcu pracy znajduje się bibliografia. Tekst pracy został mi dostarczony na piśmie oraz w wersji elektronicznej, a również dołączono kopie artykułów napisanych przez Autora i związanych z doktoratem.

Doktorant sformułował dwie tezy w swojej pracy:

- 1. Zmniejszanie rzędu kwantyla podczas procesu optymalizacji poprawia jakość nałożenia.**
- 2. Wprowadzenie dwukierunkowych zmian rzędu kwantyla sprzyja osiągnięciu globalnego optimum miary jakości nałożenia.**

Szczegółowa treść rozprawy

Omawiana praca zawiera następujące rozdziały:

- 0) Wprowadzenie – rozdział przedstawiający tezy oraz omawiający zawartość pracy.
- 1) Nakładanie obrazów.
- 2) Miara odległości Hausdorffa.
- 3) Metoda zmiennego rzędu kwantyla.
- 4) Zastosowanie do kontroli jakości radioterapii.
- 5) Wrażliwość metody.
- 6) Podsumowanie.

Recenzja merytoryczna rozprawy

Omawiana praca doktorska dotyczy niezmiernie modnego i aktualnego zagadnienia – nakładania obrazów. Sam termin "nakładanie" przyjął się w literaturze polskiej, ale nie oddaje istoty rzeczy, ponieważ nakładanie obrazów kojarzy się z prostą czynnością superpozycji. Czasami używa się też określenia "pasowanie obrazów", które budzi niejasne skojarzenia. Termin angielski "image registration" można przetłumaczyć jako rejestrację obrazu, ale ta rejestracja ma na celu znalezienie optymalnej transformacji geometrycznej między dwoma różnymi zdjęciami tego samego obiektu i nie zgadza się z potocznym znaczeniem rejestracji. Tak więc zamiast ścisłego terminu "optymalna transformacja geometryczna obrazu" będziemy dalej używać określenia "nakładanie obrazu".

W rozprawie odczuwa się brak określenia, jakie są jej podstawowe cele, a także zestawienia najważniejszych osiągnięć.

W rozprawie rozdziałem wprowadzającym w dziedzinę nakładania obrazów jest rozdział 1. Rozdział ten bardzo szybko przechodzi do nakładania obrazów medycznych, a następnie do definicji miar odległości między zbiorami, a w szczególności do miary Hausdorffa.

Natychmiastowe wejście w detale przyjętego rozwiązania powoduje, że praca mocno przypomina projekt techniczny, a mniej rozprawę. Trzeba jednak powiedzieć, że w ramach przyjętej konwencji przedstawienia pracy daje się ona czytać stosunkowo lekko i jest napisana zrozumiale, co wyróżnia ją pozytywnie spośród wielu innych prac.

Wspomniany niedosyt wprowadzenia w zagadnienie jest dość istotny, ponieważ jego konkwencją jest brak porównania uzyskanych wyników z wynikami, które mogłyby być otrzymane przy użyciu innych metod, tzn. mamy wyniki, które na oko wydają się dobre, ale nie są obiektywnie ocenione.

W szczególności brak jest przeglądu algorytmów, które mogłyby być zastosowane do nakładania. Punktem startowym mogło być nawet odwołanie się do Wikipedii, w której stwierdza się, że możliwa jest optymalizacja transformacji geometrycznej na zasadzie porównania obszarów lub porównania cech w obrazach. W Wikipedii wymienione są też transformacje liniowe oraz transformacje elastyczne (niesztywne). Wspomniane jest też, że metody znajdujące transformacje mogą stosować poszukiwanie bądź mogą być metodami bezpośrednimi, takimi jak metoda Lucas-Kanade oraz metody fazowe. Wspomina się, że stosowane są metody transformacji w dziedzinie obrazu i w dziedzinie częstotliwości. Zagadnienia te są bardzo obszerne i pełniejsze ich rozwinięcie nie byłoby celowe, ale jakieś umiejscowienie pracy doktorskiej w istniejącej literaturze powinno być.

W dalszym ciągu odczuwa się brak przeglądu literatury dotyczącej nakładania obrazów, a w szczególności obrazów medycznych. Jako przykład można tu wymienić artykuły: Zitova, "Image Registration Methods: A Survey", *Image and Vision Computing*, 21, str. 977-1000, 2003 oraz J. Salvi, "A review of Recent Range Image Registration Methods with Accuracy Evaluation", *Image Vision and Computing*, 25, str. 578-596, 2007.

Brak jest też przeglądu literatury dotyczącej miary Hausdorffa. Tu przykładowo można wymienić artykuł: X. Peng, "Feature-Based Nonrigid Image Registration Using Hausdorff Distance Matching Procedure", *Optical Engineering*, 46, iss. 5, art. 057201, May 2007. Inne artykuły to W. J., Rucklidge, "Lower Bounds for the Complexity of the Hausdorff Distance", Technical Report TR94-1441, url = "citeseer.ist.psu.edu/rucklidge93lower.html" oraz V. Sudha, "Robust Hausdorff Distance Measure for Face Recognition", *Pattern Recognition*, 40, str 431-442, 2007.

Brak jest w pracy jakiegokolwiek wzmianki o istniejącym oprogramowaniu, nawet dostępnym bezpłatnie. Dla przykładu Wikipedia wymienia 3 programy (ITK, AIR, FLIRT) i kilka produktów komercyjnych. Do Matlaba opracowano 27 programów dostępnych bezpłatnie. Pewnie większość tego oprogramowania byłaby niezbyt przydatna, ale powinno się zająć zając jakieś stanowisko w tej sprawie.

Artykuł X. Peng, "A Practical Two-Step Image Registration Method for Two-Dimensional Images", *Image Fusion* 5, 2004, str. 283-284 jest stosunkowo bliski omawianej pracy doktorskiej. Artykuł ten podkreśla, że zastosowanie odległości Hausdorffa między dwoma zbiorami uodpornia nakładanie na istnienie cech extra (outliers), na brak cech oraz na szum. W artykule nakładanie jest przeprowadzane dwuetapowo. Etap pierwszy to zastosowanie odległości Hausdorffa – do nałożenia zgrubnego. Natomiast etap drugi to nałożenie dokładne z zastosowaniem porównania obszarów. Doktorant zamiast dwuetapowości wprowadził modyfikację miary Hausdorffa poprzez zastosowanie zmiennego rzędu kwantyla.

We wspomnianym wyżej artykule Penga odległość Hausdorffa odnosi się do obrazu krawędzi. Obraz krawędzi jest generowany przy zastosowaniu operatora Canny'ego oraz przy użyciu ogniskowania krawędzi (edge focusing na str. 285 - u dołu w artykule Penga). Operator Canny'ego jest standardem opisanym w wielu artykułach i nie będzie tu omawiany. W rozprawie zagadnienie wykrywania krawędzi potraktowano bardzo pobieżnie. Na str. 49 jest mowa o przyrównaniu kierunkowej drugiej pochodnej do zera. Czy to ma jakiś związek z Laplacianem obrazu? Następnie jest mowa o znajdowaniu kierunku za pomocą operatora Sobla, który jest zwykle używany do znajdowania modułu

gradientu. W sumie niejasno przedstawiono znane rzeczy. Na rys. 4.3.1.2 przedstawiono nieco dokładniej przebieg obliczeń. Rys. 4.3.1.2.(a) to chyba obraz oryginalny a nie poprawa jasności i kontrastu. Rys. 4.3.1.2.(b) przedstawia wynik wyrównania histogramu – to rzeczywiście jest poprawa kontrastu, natomiast jasności tylko pośrednio. Porównując rys. 4.3.1.2.(c) i (d) widzimy, że otrzymano dwa obrazy, na których jest mnóstwo krawędzi, dla których odpowiedniki są mniej lub więcej jednoznaczne. Natomiast na rys. 4.3.1.2.(e) i (f) są krawędzie wybrane w sposób nie opisany w rozprawie, ale można domniemywać, że zrobiono to ręcznie. W artykule Penga ogniskowanie krawędzi przyjęto wg artykułu F. Bergholm, "Edge Focusing", Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9(16), str. 726-741, 1987. Algorytm Bergholma używa reprezentacji w przestrzeni skalowanej w celu znalezienia krawędzi istotnych w obrazie. Początkowo krawędzie są znajdowane w rozdzielczości zgrubej. Dokonuje się tego rozmazując obraz za pomocą splotu z funkcją Gaussa i następnie znalezienie pikseli, w których gradient osiąga lokalne maksimum i jednocześnie jest większy od wartości progowej. Następnie algorytm ogniskuje się na znalezionych krawędziach śledząc ich przebieg w drobniejszych rozdzielczościach, tj. w obrazach, które wygładzono przy użyciu drobniejszego filtra Gaussa. W drobniejszej rozdzielczości krawędzie poszukiwane są tylko w obliżu obszarów, w których znaleziono krawędzie w skali bardziej zgrubej.

W związku z obrazami w rozdz. 4 nasuwa się uwaga, że w zasadzie porównywane są tylko obrazy krawędzi. Natomiast brak jest zestawienia obrazu odniesienia i obrazu portalowego oraz wyniku ich nałożenia. Mogłyby być porównane np. obrazy 4.2(a) oraz (b), z tym że w obrazie (b) należałoby poprawić kontrast, bo nic nie widać.

Wyrównanie histogramu na rys. 4.3.1.2(b) jest oczywiście operacją poprawną. Jednak nasuwa się pytanie, dlaczego jeśli chodzi o porównanie dwóch obrazów to nie sprowadzić histogramu obrazu portalowego do histogramu obrazu odniesienia. Powinny wtedy być porównywane dwa obrazy znacznie podobniejsze do siebie. Zagadnienie dopasowania histogramu do rozkładu zadanego jest trochę trudniejsze od wyrównania histogramu do rozkładu równomiernego, ale jest znane w podręcznikach przetwarzania obrazów.

Nakładanie konturów wynikających z osłon i nakładanie struktur anatomicznych powinno mieć inną wagę, bo ustawianie osłon to nie to samo, co ustawianie człowieka. W pracy zagadnienie to nie zostało uwzględnione.

Uwagi szczegółowe

Przyjęcie odległości zerowej dla punktów dostatecznie odległych (wzór 1.1.4) jest błędne. Punkty takie nie powinny być uwzględniane w rachunku, a to nie znaczy, że ich odległość jest zero.

W głównym algorytmie na str. 35 występuje pewna niejasność wynikająca chyba ze zbyt związłego przedstawienia algorytmu. Jeżeli jesteśmy na linii 11 to wykonujemy bezwarunkowy skok do linii 7. Pytanie jest, co się zmieniło i dlaczego nie mamy nieskończonej pętli?

W pierwszym paragrafie na str. 60 jest mowa o zmianie położenia przez translację, skalowanie i obrót. Jednak w odniesieniu do testu 1 na str. 60 wyniki przestawiono w tabelach 5.1.1 i 5.1.2. Wg Autora tabele te uwzględniają skalowanie i "jednoczesny" obrót. Jednak kolejność operacji ma znaczenie, a ponadto powinno być podane względem jakiego punktu dokonano skalowania, a także obrotu. Na temat translacji nie podano żadnych informacji. Niezależnie od tabel te same wyniki można było przestawić w postaci wykresów 3-wymiarowych.

Zupełnie podobne uwagi można sformułować w odniesieniu do testu 2 na str. 63, gdzie odpowiednimi operacjami były skalowanie i translacja. Podane informacje o translacji sformułowano nieścisłe, ponieważ translacje w obu osiach zmieniają się nie w przedziale od -50 do 50, jak napisał Autor, a przyjmują jedynie trzy wartości -50, 0 i 50. Uzyskane wyniki również powinny dać się przedstawić w postaci czytelnych wykresów.

Uwagi do testu 3 na str. 66 są podobne jak dla testu 2.

W stosunku do testów 4, 5, i 6 wszędzie występuje uwaga, że chodzi nie o zakresy, np. $T_x \in \langle -50, 50 \rangle$, a o dwie dyskretne wartości $T_x = -50$ oraz $T_x = 50$. Poza tym inne uwagi jak w stosunku do wcześniej omawianych testów.

W odniesieniu do zakłócania piksli na rys. 70 nasuwają się następujące uwagi. Na podstawie tekstu pracy można przypuszczać, że piksle zakłócone są to piksle przesunięte względem swojego położenia oryginalnego. Oznaczałoby to, że zamiast krzywej przeważnie ciągłej mamy krzywą, której punkty wyskakują ze swojego pierwotnego położenia. Jednak nieznana jest ani wartość ani kierunek takich wyskoków, a może to mieć znaczny wpływ na wynik. Dla przykładu mogłoby wystąpić zakłócenie w postaci translacji *wszystkich* piksli o jeden i nie powinno to zepsuć wyniku nakładania.

Ważniejsze wątpliwości odnoszą się do sposobu zakłócania obrazu. Z natury rzeczy zakłócenia nie pokazują się w obrazie zbinaryzowanym, a raczej w procesie akwizycji obrazu, tj. w obrazie odniesienia, a zwłaszcza a w obrazach portalowych. W związku z tym bardziej przekonujące byłoby zakłócanie piksli w tych obrazach przy zastosowaniu próbek ze znanych rozkładów prawdopodobieństwa. Ze względu na znaną naturę promieniowania i znane własności kamery można by pewnie znaleźć najbardziej odpowiedni dyskretny rozkład prawdopodobieństwa, jednak wydaje się, że zagadnienie to bardziej może pasować do doktoratu z fizyki niż informatyki.

W odniesieniu do rozdz. 5.3 o zmiennym rzędzie kwantyla wyjaśnienia wymagają pewne detale. Określenie "dwukierunkowa zmiana kwantyla" jest dość myląca i jej wyjaśnienie wymagało od czytelnika dość długiego czasu. Zmienność dwukierunkowa sugerowałaby, że dana wielkość może rosnąć lub maleć i że zjawisko to ma charakter mniej więcej symetryczny. Tymczasem w omawianej sytuacji rząd kwantyla zawsze jest zmniejszany począwszy od wartości 1, a w pewnych przypadkach występuje powrót do warunków początkowych, czyli restart i w nowym punkcie położenia obrazu nakładanego przyjmujemy ponownie rząd kwantyla równy 1. Tak więc liczba dwukierunkowych zmian kwantyla w wierszu czwartym na str. 83 oznacza po prostu liczbę restartów.

Punkt 1 na str. 83 jest niejasny. Początkowo porównujemy iteracje $i - 1$ oraz i . Obie te iteracje kończą się w chwili osiągnięcia błędu równego 0. Restart miał miejsce jeżeli w iteracji $i - 1$ rząd kwantyla był mniejszy, a w iteracji i był większy. Następnie jest jednak powiedziane, że miara odległości ma być poniżej ϵ . Jak to pogodzić z wymienionym wyżej, już osiągniętym zerem?

Na str. 83 powiedziano, że zarejestrowano liczbę restartów poprawiających wynik. Jak rozumiem tych restartów może być kilka dla każdego rozpatrywanego obrazu. Ponadto, jak podaje Autor, zarejestrowano rząd kwantyla kończącego obliczenia. Tych liczb nie podano jednak w pracy, więc odwołanie się do nich bez dalszych wyjaśnień nie ma sensu.

Tabele 5.3.1 i 5.3.2 chyba powinny być zamienione miejscami. Tabela 5.3.2 dotyczy prostszej sytuacji, kiedy tylko zmniejszamy rząd kwantyla i w pewnych przypadkach dostajemy lepszy wynik. Natomiast tabela 5.3.1 podaje wyniki odnoszące się do restartów. Wynika stąd, że zbiór prób w tablicy 5.3.1 jest podzbiorem zbioru prób w tablicy 5.3.2.

Ocena ogólna rozprawy

Najważniejsze fakty przemawiające za pozytywną oceną rozprawy mgra inż. Piotra Guta są:

1. Opracowanie szeregu publikacji, a w tym: 3 artykułów w czasopismach z zakresu onkologii i radioterapii, 4 referatów konferencyjnych, w tym dwóch na konferencjach międzynarodowych i dwóch na konferencjach krajowych, a także dwóch skrótów na konferencje krajowe. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że wszystkie te publikacje były publikacjami zbiorowymi pisanymi przez 4 do 6 autorów. Ustalenie roli poszczególnych autorów w przygotowaniu tych publikacji wydaje mi się trudne, jednak z pewnością Doktorant odegrał istotną rolę w przygotowaniu i przebadaniu oprogramowania oraz wykonaniu prac obliczeniowych.

2. Współudział w opracowaniu software'u do nakładania obrazów. Software ten został przetestowany w Świętokrzyskim Centrum Onkologii i ma wyraźny walor komercyjny, czego wyrazem jest też zastosowanie go w czterech ośrodkach medycznych.

3. Udział w projekcie KBN związanym z analizą powtarzalności napromieniania wiązkami zewnętrznymi z wykorzystaniem zdjęć portalowych.

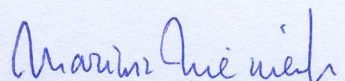
Ocena dorobku Autora w zakresie nie przedstawionym w pracy doktorskiej

Dorobek Autora poza pracą doktorską polega głównie na wykonaniu na przestrzeni ok. 9 lat różnorodnych projektów z zakresu budowy i wdrożenia systemów informatycznych oraz aplikacji na potrzeby różnych firm.

Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska i dorobek naukowy mgr inż. Piotra Guta reprezentują poziom naukowy potwierdzony kilkoma publikacjami w literaturze krajowej i międzynarodowej. Wszystkie te publikacje odnoszą się do dziedziny informatyki medycznej oraz analizy obrazów w tej właśnie dziedzinie.

Zarówno recenzowana rozprawa jak i ogólny dorobek naukowy Doktoranta spełniają wymagania Ustawy o stopniach i tytułach naukowych, wobec czego wnioskuję o dopuszczenie tej rozprawy do publicznej obrony.



Mariusz Nieniewski