

dr hab. inż. Artur Przelaskowski  
Instytut Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej  
Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Warszawa, 15.10.2007r

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY  
NAUKOWEJ INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN**

**Tytuł rozprawy:**

**Optymalizacja metody nakładania obrazów binarnych, mało  
wrażliwej na błędy danych**

**Autor rozprawy:**

**Piotr Gut**

Na początku chciałbym zapewnić o pozytywnej ocenie opiniowanej przeze mnie rozprawy. Główną jej zaletą jest duże znaczenie uzyskanych rezultatów. Opracowana metoda nakładania obrazów binarnych wykorzystana, jako główny element, w narzędziu do kontroli jakości radioterapii znalazła potwierdzenie w praktyce klinicznej kilku ośrodków medycznych w Polsce; została zweryfikowana i zaakceptowana przez środowisko medyczne. Kluczowe osiągnięcie Autora – algorytm nakładania zarysów struktur i pola napromieniania z dopasowaniem metryki odległości regulowanej rzędem kwantyla – jest ciekawym, oryginalnym pomysłem dostosowania wykorzystanej miary podobieństwa do charakteru porównywanych segmentów konturowych. W rozwiązaniu problemu użyto prostych środków, metod obliczeniowych o akceptowalnej złożoności, adekwatnych do specyfiki zastosowania, implementując metodę w bardzo przyjaznym środowisku programu AutoPort.

Praca nie jest jednak wolna od kilku wad natury opisowej (błędy, niekonsekwencja opisu, miejscami niezrozumiały porządek prezentacji). Budzi też niekiedy wątpliwości dotyczące wykorzystanych metod naukowych. Wskazano je poniżej w bardziej szczegółowej analizie głównych tez rozprawy, kontekstu literaturowego, proponowanych algorytmów, eksperymentów i odniesienia aplikacyjnego.

Niedoskonała forma prezentacji efektów prac badawczych, a także niektóre braki w formalnie rozumianym procesie tytułowej optymalizacji opracowanych algorytmów, wynikające zapewne

**częściowo z zespołowego i interdyscyplinarnego charakteru pracy w ramach większego projektu, nie podważają jednak wysokiej oceny osiągnięć naukowych prezentowanych w rozprawie oraz oryginalnego wkładu Autora w rozwiązanie użytecznie istotnego problemu badawczego.**

### **Ogólna charakterystyka pracy**

**Przedmiotem rozprawy** jest zagadnienie nakładania obrazów/badań obrazowych uzyskanych różnymi technikami akwizycji w fazie planowania leczenia oraz później, podczas sesji terapeutycznej, na potrzeby kontroli jakości radioterapii. Wspomaganie metodami komputerowymi technik radioterapii jest bardzo istotnym zagadnieniem z punktu widzenia skuteczności tego sposobu leczenia raka. Precyzja naświetlań, możliwość szybkiej i dokładnej korekty geometrii stosowanych przy napromienieniu w kolejnych sesjach, numeryczna kontrola całego procesu, możliwość korekt i porównań, także poprawy skuteczności pracy technika czy lekarza poprzez wizualizację i monitorowanie całego procesu doboru optymalnych parametrów geometrycznych naświetlania jest celem podjętych kilka lat temu badań. Sercem tego systemu wspomagania są efektywne procedury nałożenia (dopasowania) zdjęć referencyjnego (dokładniej przybliżającego realne struktury objęte procesem terapii) i portalowego (kontrolnego, wykonanego w czasie danego etapu terapii) z kontrolą fizycznych wymiarów koniecznych korekt w geometrii naświetlań. Od jakości tych procedur zależy skuteczność, a więc użyteczność całego narzędzia; procedury te stanowią główny przedmiot badań niniejszej rozprawy.

**Teza rozprawy** dotyczy szczegółowych koncepcji regulacji miary odległości wpływającej w sposób istotny na kryterium jakości nałożenia obrazów referencyjnego i sprawdzającego. Wykorzystano miarę odległości Hausdorffa, częściową skierowaną z doborem rzędu kwantyla, która pozwala zmierzyć jakość dopasowania obiektów z pominięciem tzw. danych błędnych. Zaproponowano iteracyjny algorytm zmniejszania rzędu kwantyla aż do uzyskania zerowej odległości częściowej, przy czym położenie końcowe obrazu nakładanego staje się początkowym w kolejnej iteracji, w której poszukiwane jest lepsze dopasowanie poprzez uzyskanie zerowej odległości częściowej przy większym rzędzie kwantyla. Celem jest uzyskanie optimum jakości nałożenia.

**Oryginalne rozwiązania** przedstawione przez Doktoranta to przede wszystkim:

- a) metoda nakładania (pasowania) obrazów binarnych, zwana metodą zmiennego rzędu kwantyla, w szczególności zaś:
  - o sztywny zestaw parametrów przekształceń afinicznych i całego algorytmu,
  - o implementacja metody obliczania odległości Hausdorffa (OH) i wyznaczania lokalnego minimum odległości z wykorzystaniem transformacji odległościowej i histogramów odległości;
  - o ustalony porządek poszukiwania przekształcenia dającego minimum OH, w pierwszej

- kolejności z wykorzystaniem 3 podstawowych operacji afinicznych dobieranych według kryterium lokalnego minimum częściowej OH, z możliwie dużym krokiem przesunięć, obrotu i skalowania, a w drugiej kolejności: z wyborem jednego przekształcenia dającego lokalne minimum odległości od obrazu referencyjnego;
- o iteracyjny dobór rzędu kwantyla częściowej, skierowanej miary OH: pomysł polega na uzyskaniu zerowej OH przy możliwie dużym rzędzie kwantyla (czyli wzajemnym pokryciu możliwie dużej liczby punktów obu nakładanych obiektów); uzyskany w danej iteracji poziom nałożenia staje się początkowym w kolejnej iteracji przekształceń afinicznych, co ma prowadzić do pokrycia punktów z większym rzędem kwantyla (Autor nazywa to dwukierunkowymi zmianami rzędu kwantyla);
  - b) bardzo przyjazne użytkownikowi oprogramowanie AutoPort z zaimplementowaną metodą zmiennego rzędu kwantyla, wysoko oceniane przez użytkowników, dostosowane do wymogów pracy w warunkach klinicznych, weryfikowane w kilku ośrodkach medycznych; chociaż ograniczony automatyzm metody i duży wpływ użytkownika na ostateczny efekt nakładania obrazów budzi obawy o subiektywizm i brak powtarzalności metody, to jednak bardzo przemyślany interfejs jest użytkownikowi niezwykle pomocny, minimalizuje błędy pozwalając na ostateczną weryfikację osobie odpowiedzialnej za terapię;
  - c) testy oceny wrażliwości metody na zmianę położenia startowego obrazu nakładanego oraz zaburzenia danych; wykazano poprawę jakości nałożenia obrazów przy wykorzystaniu zmiennego rzędu kwantyla, przy czym cały proces dopasowywania obrazów realizowano według sztywnego algorytmu proponowanej metody.

### **Ocena rozprawy**

Ogólna ocena rozprawy jest pozytywna, bo opisane prace dotyczą konkretnego, ważnego problemu badawczego, bo rozprawa zawiera oryginalne rozwiązania, które zostały zaimplementowane w bardzo przyjaznym dla użytkownika środowisku oraz wykorzystane w pracach klinicznych, uzyskując wysokie oceny.

### **Dodatkowe zalety pracy to przede wszystkim:**

- w dużej części klarowny, konsekwentny opis algorytmów oraz eksperymentów oceny wrażliwości metody, objaśnienia metod, użycie dobrych przykładów;
- oszacowanie złożoności obliczeniowej opracowanych algorytmów; chociaż nieco uproszczone, daje jednak pojęcie o złożoności prezentowanej metody; brakuje tylko rozważań optymalizacyjnych – nie zawsze bowiem dane operacje muszą być wykonywane na wszystkich pikselach obrazu; w tym kontekście przydałoby się oszacowanie złożoności całej metody zmiennego rzędu kwantyla.

**Słabe strony rozprawy to** w pierwszej kolejności wątpliwości natury metodologicznej:

- niejasny zakres i charakter tytułowej optymalizacji; wydaje się, że dotyczy ona wspomnianego zabiegu doboru rzędu kwantyla w celu lepszego dopasowania struktur i pola naświetlań; można jednak odnieść wrażenie, że jest to w dużej mierze optymalizacja samej miary odległości wykorzystywanej w kryterium oceny jakości dopasowania: stosujemy coraz bardziej wrażliwe kryterium nałożenia potwierdzające pokrycie tych obiektów; na ile jest to podejście lepsze od minimalizacji OH z kwantylem rzędu 1 (najczulsza odległość) według określonej ścieżki doboru przekształceń afinicznych? nie jest wyjaśniony dobór konkretnych wartości parametrów algorytmu (wartości podano jako ustalone z góry bez dyskusji ewentualnych alternatyw); nie ma dyskusji odnoszącej się do skuteczności innych metod (choćby wykorzystujących jako miarę średnią informację wzajemną, odległość Kullbacka-Leiblera, czy też wyznaczanie i dopasowanie punktów istotnych obu obiektów itp.);
- nieprecyzyjne użycie określenia błędów w danych; co jest tutaj błędem, jakie jest źródło błędów, czy np. dodatkowa informacja z obrazu wyższej jakości? czy trzeba eliminować nadmiarowe piksele, czy może je wykorzystać w celu lepszego dopasowania do niedostępnego wzorca? itd.;
- skromny raport z eksperymentów (rozdz. 5), które dotyczą jedynie oceny wrażliwości metody przy dwóch parach obrazów testowych (1 zestaw); brakuje: statystycznie istotnego zbioru realnych danych testowych, porównań z metodami alternatywnymi, testów z doбором parametrów prezentowanego algorytmu, weryfikacji całego narzędzia AutoPort; bez definicji błędnych danych i bez modelowania ich udziału w pasowanych konturach pozostają niejasności w ocenie weryfikowanych metod.

Zastrzeżenia budzi sposób prezentacji treści rozprawy w niektórych punktach. Przy lekturze rozdz. 2 i 3 niejasne jest zawężenie tematu do problemu nakładania dwóch obrazów binarnych przy uproszczeniu założeń metody zmiennego rzędu kwantyla – częściowe wyjaśnienie znalazłem dopiero w rozdz. 4 (konkretne uwarunkowania radioterapii, ogólna koncepcja i realizacja narzędzia AutoPort). Ponadto, uwagi dotyczące części opisowej są następujące:

- teza rozprawy jest zbyt szczegółowa, mało zrozumiała (proces optymalizacji czego? dwukierunkowe zmiany rzędu, czyli jakie?); występujące w drugim punkcie tezy sformułowanie ‘globalne optimum miary jakości nałożenia’ właściwie wskazuje, że optymalizujemy miarę jakości nałożenia, ale czy o to chodziło Autorowi rozprawy?
- na str. 3 wspomniano, że pierwszym ważnym elementem procesu nakładania obrazów jest dobór odpowiednich cech porównywanych obrazów i ich treści, drugim zaś stosowanie wybranej miary jakości nałożenia; problematyczne wydaje się skoncentrowanie w ramach pracy jedynie nad tym drugim elementem bez formułowania chociażby przybliżonej charakterystyki

czy bardziej formalnych założeń dotyczących optymalizacji elementu pierwszego (tytuł rozprawy wskazuje na optymalizację całego procesu nakładania obrazów);

- wątpliwości budzi brak obiektowego podejścia w analizie nakładanych obrazów (przy braku optymalizacji metody wyznaczania krawędzi i interaktywnym, subiektywnym doborze zbioru pasowanych krawędzi powstają wątpliwości dotyczące wiarygodności całej metody nakładania); znajduje to odbicie także w opisie szczegółowym: pojęcie punktu P najbardziej oddalonego od R (w opisie na str. 17-20) jest niejasne (chodzi chyba o punkt obiektu skalowanego czy obracanego); brakuje też syntetycznego schematu całej metody (początek rozdz. 3), bardzo użytecznego przed opisem szczegółowym kolejnych etapów;
- charakterystyka metod nakładania obrazów (rozdz. 1) wykorzystuje dość stare pozycje i wydaje się odbiegać od dzisiejszych realiów (zostało to nieco uzupełnione w p. 4.2, jednak bez istotnych szczegółów);
- mało przekonujące jest uzasadnienie wyboru miary odległościowej Hausdorffa (skierowanej, częściowej) jako optymalnej miary jakości nałożenia (podano definicję 4 miar podstawowych, dokonano solidnego przeglądu literatury, ale nie uzasadniono w sposób wystarczający takiego właśnie wyboru);
- bardziej szczegółowe uwagi natury korektorskiej to: użyto tego samego oznaczenia (małe delta) do oznaczenia kilku miar ze stron 4 i 5 rozprawy; brak definicji kwantyla na str. 5 (kilka razy powtarzający się problem używania pojęć czy oznaczeń tłumaczonych dopiero w dalszych częściach pracy (bez odnośników)); brak ujednoczenia formalnego opisu miar cytowanych na str. 6-7; niejasna jest zamiana funkcji min/max na kres dolny i górny w definicjach OH; stwierdzenie, że wynik kolejnych transformacji jest zapisywany w macierzy M wydaje się błędny (str. 16); nie podane są ograniczenia na wartość parametru  $k$  (kroku optymalizacji), co szczególnie w przypadku skalowania może zwiększyć liczbę wykonywanych niepotrzebnie obliczeń (obiekt ucieka poza obraz); niekonsekwencja: zapalony piksel według zapisu na str. 11 oraz przykładu ze str. 12 ma wartość 1, natomiast w słabo opisanym algorytmie na str. 20 (niezdefiniowano wartości początkowych  $d_x, d_y, d_p, x_r, y_r, k$ , brak komentarzy) - ma wartość 0; niejasne jest liczenie odległości od 1 (wzór 3.4.2); niejasne jest, dlaczego przy liczeniu OH według (3.5.6) wykonywane jest mnożenie przez wartość  $l_w$ , co zwiększa złożoność obliczeniową; we wzorze (3.7.3) przy  $l$  brakuje indeksu  $i$ ; stosowanie terminu brzezi zamiast krawędzie jest dyskusyjne; sformułowanie 'gradientem będziemy oznaczać różnicę miar odległości ...' (str. 29) nie jest szczęśliwe; brakuje uzasadnień optymalności metody największego spadku; niejasne jest ustawienie wartości  $k$  (p.51 i pp.87-93 algorytmu ze str. 31-33); jak są ustalane środki ciężkości w algorytmie głównym?; w punkcie 11 algorytmu ze str. 35 powinno być: goto: 8 (zamiast goto: 7); przy szacowaniu złożoności obliczeniowej według

(3.9.1.1) brak założenia, że wszystkie kombinacje wartości pikseli obrazu są jednakowo prawdopodobne; założenie niezależności rozkładu Bernoulliego wymagało choćby krótkiego komentarza (str. 38); w opisie AutoPort brak jasnych kryteriów doboru metody wyznaczania krawędzi, oceny wpływu wyrównania histogramu i doboru progów na efekty dopasowania obrazów; brakuje analizy jakości obrazów pasowanych do siebie (np. na rys. 5.5a) - kontur nakładany jest znacznie wyższej jakości od konturu referencyjnego, mimo że jest wyznaczany na podstawie obrazu o znacznie gorszej jakości – dlaczego?; rola bloku 2 na rys. 4.3.2.1 jest niejasna: jeśli w wyniku niekontrolowanej modyfikacji kontrastu i poziomu jasności ulegają zmianie dane źródłowe (tak sugeruje rysunek i opis), to istnieją obawy o powtarzalność i wiarygodność metody, a także o właściwe zabezpieczenie danych; tabele wypełniające całe strony rozprawy nie są najlepszą formą prezentacji wyników; nie wyjaśniono dokładnie metody zaburzania danych w p. 5.2.

### Podsumowanie

Przydatność rozprawy zarówno dla nauk technicznych, jak też, wydaje się, medycznych jest niewątpliwa. Proponowane wspomaganie procesu kontroli jakości w radioterapii, rozumiane także szerzej jako zagadnienie nakładania obrazów konieczne w różnych formach obrazowania multimodalnego jest niezwykle aktualne. O wartości, jaką ma zwiększenie skuteczności procesu radioterapii nie muszę nikogo przekonywać, to przecież proponowane przez Autora rozwiązania pozwalają dokładniej kontrolować proces napromieniania, korygować błędy geometrii naświetlań w danej sesji modyfikując przebieg sesji kolejnych. Trudno więc przecenić efekty tej pracy. Należy je wyraźnie odróżnić od wykazanych przeze mnie uchybień, które w dużej części mają charakter polemiczny i nie wpływają w sposób istotny na pozytywną ocenę całej rozprawy.

Podsumowując, efekty prac badawczych Pana Piotra Guta w zakresie efektywnych narzędzi komputerowej kontroli jakości radioterapii oceniam wysoko. **Rozprawę zaś zaliczam do kategorii spełniającej wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.**

Artur Pizelochowski