

Łódź, 27 lipca 2019 r.

prof. dr hab. inż. Michał Strzelecki
Politechnika Łódzka, Instytut Elektroniki
ul. Wólczańska 211/215
90-924 Łódź

WPLYNĘŁO

05 SIE. 2019

dn.....

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Zuzanny Krawczyk
„Automatyczne metody tworzenia trójwymiarowych zindywidualizowanych modeli szkieletów z wykorzystaniem morfingu” (promotor: dr hab. inż. Jacek Starzyński, prof. nadzw., promotor pomocniczy: dr inż. Robert Szmurło)

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Lecha Grzesiaka z dnia 4.07.2019 r. informujące o powołaniu mnie przez Radę Wydziału Elektrycznego PW na recenzenta w postępowaniu doktorskim mgr inż. Zuzanny Krawczyk prowadzonym w dyscyplinie informatyka.

Współczesne tomograficzne metody obrazowania medycznego umożliwiają wizualizację wewnętrznych ludzkich organów oraz narządów bez konieczności wykonywania zabiegów chirurgicznych. Dzięki zastosowaniu metod komputerowej analizy obrazów przed lekarzami otworzyły się szerokie możliwości uzyskiwania nie tylko jakościowej, ale również ilościowej informacji o obrazowanych strukturach organizmu, wspomagając takie obszary medycyny jak diagnostyka, planowanie terapii, monitorowanie jej efektów lub rehabilitacja. Dodatkowo, rozwój metod grafiki komputerowej pozwolił na tworzenie trójwymiarowych modeli ocenianych narządów, co ma bardzo duże znaczenie m.in. w planowaniu operacji chirurgicznych, np. przy wspomaganiu zabiegów endoskopowych lub zabiegów biopsji. Lekarz wykonujący taki zabieg może dokładnie określić położenie końcówki endoskopu wewnątrz jelita grubego lub igły do biopsji wprowadzanej do płuc dzięki wirtualnej lokalizacji tych narzędzi posługując się wytworzonym wcześniej modelem 3D tych organów. Innym przykładem zastosowania modelowania w medycynie są trójwymiarowe modele naczyń krwionośnych, dzięki którym można zlokalizować i przeanalizować z występujące tam patologie jak przewężenia bądź tętniaki oraz dzięki temu odpowiednio zaplanować ewentualną interwencję chirurgiczną. W taką tematykę wpisuje się obecna rozprawa doktorska, której głównym celem jest opracowanie oraz implementacja procedur umożliwiających wygenerowanie trójwymiarowych modeli wybranych elementów układu kostnego, w szczególności obejmujących obszar miednicy. Tematykę pracy uważam za

bardzo ważną jak i aktualną, zaś uzyskane wyniki mogą mieć istotne znaczenie w procesie planowania i wspomagania zabiegów chirurgicznych związanych z obszarem modelowanych struktur kostnych, co może się przyczynić do zwiększania skuteczności tych zabiegów i w efekcie poprawi jakość opieki medycznej nad pacjentami.

Główny cel rozprawy, jakim jest opracowanie metody automatycznego tworzenia trójwymiarowych modeli kości miednicy na podstawie dwuwymiarowych obrazów uzyskanych z tomografii komputerowej jest sformułowany w sposób jasny i przejrzysty. Również czytelna jest przedstawiona teza pracy:

„Metoda oparta o połączenie: technik morfingu zastosowanych do przekształcania wzorcowego modelu szkieletu według danych pozyskanych z obrazów medycznych, detekcji obiektów z wykorzystaniem głębokiej sieci neuronowej oraz fuzji algorytmów segmentacji pozwala na tworzenie użytecznych, zindywidualizowanych trójwymiarowych modeli kości.”

Teza ta nie jest jednak w pełni precyzyjna, ponieważ stwierdza jedynie, że zaproponowana metoda umożliwi skonstruowanie odpowiednich modeli. Nie określa jednak czy, proponowana metoda będzie się charakteryzowała jakimiś cechami przewyższającymi metody do tej pory istniejące. W mojej opinii teza powinna być uzupełniona o konstatację, że opracowana metoda zapewnia utworzenie dokładniejszego modelu w porównaniu do tego uzyskanego za pomocą klasycznych metod analizy obrazów, co zresztą zostało w pracy wykazane.

Praca składa się pięciu rozdziałów. Pierwszy z nich stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy, przegląd literatury oraz tezę pracy. Przedstawiono również proponowane rozwiązania dotyczące opracowywanych metod tworzenia trójwymiarowych modeli kości na podstawie obrazów ich przekrojów.

W rozdziale drugim przedstawiono wybrane metody obrazowania medycznego oraz omówiono formaty danych medycznych. Przedstawiono także pierwszą z metod tworzenia trójwymiarowego modelu kości określoną przez Autorkę jako metodę klasyczną. Metoda ta opiera się na typowym i poprawnym schemacie analizy obrazów, obejmującym wstępne przetwarzanie, segmentację mającą na celu wydzielenie struktur kostnych oraz w końcowym etapie wytworzenie trójwymiarowej siatki powierzchniowej modelu analizowanych struktur. Do wstępnego przetwarzania obrazów wykorzystano dwa algorytmy redukcji szumów: filtrację Gaussa oraz algorytm dyfuzji anizotropowej z wykorzystaniem modelu Perony-Malika. Zastosowano szereg metod segmentacji: progowanie metodą Otsu, estymację konturów obiektu, progowanie po przekształceniu obrazu do przestrzeni CIElab, technikę rozlewania. Ten ostatni algorytm to w istocie metoda rozrostu obszaru z określonymi odpowiednio warunkami ograniczającymi ten rozrost (co zresztą Doktorantka przyznaje). Zatem określanie tej metody jako własnej uważam za nieco nadmierowe. Najbardziej skutecznym algorytmem segmentacji okazał się algorytm mrówkowy, należący do grupy algorytmów inteligencji roju. Autorka zaproponowała oryginalną tzw. funkcję depozycji feromonu, wykorzystującą właściwości lokalnych rozkładów jasności pikseli. Dla wydzielenia struktur kostnych z obrazów TK wykorzystano fuzję wszystkich wymienionych wcześniej algorytmów, co należy uznać za dobre rozwiązanie, ponieważ zapewnia ono (przy poprawnie zdefiniowanych warunkach fuzji wyników cząstkowych analiz) dokładniejsze wyniki niż każda z tych metod osobno. Ostatnim elementem metody była budowa siatki powierzchniowej tworzącej model 3D kości na podstawie uzyskanego w wyniku segmentacji zbioru wokseli.

Do tego celu wykorzystano algorytm maszerujących sześciątów oraz zapewniający dokładniejszy model algorytm Poissona. Rozdział ten kończy się dyskusją cech metody, w szczególności identyfikacją jej ograniczeń związanych z brakiem pełnej automatyzacji, trudnościami z optymalnym doбором parametrów metod segmentacji oraz czasochłonnością algorytmu mrówkowego, co w efekcie uniemożliwia zastosowanie opracowanej metody w czasie rzeczywistym.

Rozdział trzeci opisuje metodę tworzenia trójwymiarowego modelu kości z wykorzystaniem tak zwanego modelu referencyjnego szkieletu (w tym przypadku do tego celu wykorzystano model szkieletu męskiego danego w postaci siatki powierzchni złożonej z odpowiedniej liczby trójkątów). Metoda obejmuje trzy główne etapy. Pierwszy z nich dotyczy wykrywania prostokątnych obszarów opisanych na strukturze kości w danym przekroju tomograficznym za pomocą sieci YOLO (ang. you only look once). Sieć ta należy do tak zwanych głębokich sieci neuronowych i stanowi jedną z odmian sieci konwolucyjnych. Kolejnym etapem jest detekcja wokseli należących do struktury kostnej w wykrytych obszarach. Do tego celu wykorzystano fuzję trzech algorytmów detekcji krawędzi: filtru Canny'ego, metody wykrywania przejścia przez zero operatora LoG oraz algorytmu mrówkowego. Ostatnim etapem było dopasowanie modelu referencyjnego do uzyskanych krawędzi obszarów kości w poszczególnych przekrojach za pomocą metod tzw. morfingu. W pracy wykorzystano dwie metody: algorytm dryftu punktów (ang. coherent point drift, CPD) oraz własny algorytm opracowany przez Doktorantkę. Algorytm ten jest ciekawym rozwiązaniem wykorzystującym do przekształcenia współrzędnych punktów krzywą uzyskaną na podstawie estymowanego szkieletu obiektu zamiast pojedynczego punktu centralnego, co poprawia jakość dopasowania, w szczególności dla struktur wydłużonych. Autorka porównała obydwa algorytmy wykazując skuteczniejsze działanie proponowanej metody dla wybranych przykładów kości w porównaniu do algorytmu CPD. Końcowym etapem nowej metody tworzenia modelu 3D jest poprawa jakości struktury siatki uzyskanej w wyniku dopasowania modelu referencyjnego do wyników segmentacji obszarów kości za pomocą algorytmu rekonstrukcji Poissona.

Rozdział czwarty zawiera porównanie modeli 3D uzyskanych za pomocą metod opisanych w rozdziałach drugim i trzecim. Porównano dwa modele kości udowej prawej wytworzone na podstawie tych samych obrazów tomografii komputerowej. Jakościowa analiza uzyskanych modeli wykazała, że odpowiednio dopasowany model referencyjny jest dokładniejszy w porównaniu do modelu uzyskanego na podstawie klasycznych metod analizy obrazów. Dodatkowo, dla dalszej oceny drugiej metody, została przeprowadzona analiza modeli wytworzonych dla rzeczywistych danych dwóch pacjentów obejmujących fragment miednicy i kości udowej. Wykorzystano tu dostępne informacje o współrzędnych wykonanych przez eksperta obrysów obszarów kości, dzięki czemu można było porównać dokładność uzyskanych modeli. Przetestowano różne metody dopasowania siatek powierzchniowych (m.in. dopasowanie sztywne oraz za pomocą algorytmu CPD). Ilościowe porównanie uzyskanych modeli wykazało zgodnie z oczekiwaniami, że największą dokładnością charakteryzują się te uzyskane przy zastosowaniu algorytmu morfingu.

Zawartość pracy podsumowuje rozdział 5. Wykaz literatury obejmuje najważniejsze pozycje literatury światowej i krajowej dotyczące tematyki związanej z rozprawą. Wykaz ten zawiera również 6 publikacji współautorskich zamieszczonych w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, przy czym dwa z nich ukazały się w bardzo dobrym czasopiśmie Applied Mathematics and Computation (IF = 3.092).

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Doktorantka samodzielnie rozwiązała problem naukowy dotyczący opracowania oryginalnych metod automatycznego tworzenia zindywidualizowanych trójwymiarowych modeli kości miednicy na podstawie dwuwymiarowych obrazów tomografii komputerowej. Doktorantka wykazała się przy tym odpowiednią wiedzą teoretyczną z dyscypliny informatyka, w tym z zakresu przetwarzania i analizy obrazów biomedycznych oraz metod grafiki komputerowej. Do najważniejszych osiągnięć Autorki pracy zaliczam:

- opracowanie i implementację metody budowania trójwymiarowych modeli kości miednicy z wykorzystaniem obrazów przekrojów TK oraz klasycznych metod przetwarzania i analizy obrazów, w szczególności z zastosowaniem autorskiej wersji algorytmu mrówkowego dostosowanego do segmentacji obrazów przekrojów kości;
- opracowanie i implementację metody budowania trójwymiarowych modeli kości miednicy z wykorzystaniem modelu referencyjnego szkieletu kostnego, który został dopasowany do uzyskanych wyników segmentacji obrazów przekrojów kości z użyciem sieci neuronowej typu YOLO oraz algorytmów detekcji krawędzi.

Lektura pracy nasunęła również kilka przedstawionych poniżej uwag krytycznych i polemicznych.

1. Jedynym poważniejszym mankamentem recenzowanej rozprawy jest brak pełnej weryfikacji opracowanych metod budowy modeli kości. W przypadku metody wykorzystującej klasyczne metody analizy obrazów przeprowadzono tylko analizę jakościową uzyskanego wyniku dla jednego przypadku. W dodatku wynikowy model nie został porównany z jakimś wzorcem odniesienia, ale z modelem uzyskanym dla drugiej metody. W przypadku metody wykorzystującej dopasowanie modelu referencyjnego przeprowadzono porównanie ilościowe uzyskanych modeli z rzeczywistymi strukturami kości zobrazowanych jednak tylko dla dwóch pacjentów. Zdaję sobie sprawę z trudności obiektywnej weryfikacji takich metod (dotyczy to większości metod analizy i modelowania obrazów biomedycznych) ze względu na brak wzorców odniesienia. Jednak na podstawie analizy tylko dwóch przypadków trudno uznać opracowaną metodę za dokładną. Jej ewentualne zastosowanie w praktyce klinicznej wymagałoby szeregu dalszych testów. Ponadto zabrakło oceny eksperckiej wyników licznych stosowanych w pracy metod segmentacji, której dokonał by lekarz ortopeda. Z tekstu pracy wynika, że Doktorantka współpracowała z lekarzami z Centrum Onkologii - Instytutem im. Marii Skłodowskiej – Curie w Warszawie, zatem przeprowadzenie takiej oceny powinno być możliwe.
2. Do poprawy jakości analizowanych obrazów TK zastosowano metody filtracji dyfuzyjnej oraz filtracji Gaussa. Proszę o dokładne opisanie, jakie zakłócenia i artefakty występują w tych obrazach, skoro do ich usunięcia wystarczające okazało się zastosowanie filtra dolnoprzepustowego. Filtr ten prowadzi do rozmycia krawędzi uwidocznionych fragmentów kości. Czy fakt ten nie będzie miał negatywnego wpływu na wynik zastosowanych później metod segmentacji?
3. Skoro sieć YOLO dała dobre wyniki segmentacji generując prostokąty opisane na fragmentach kości występujących w przekrojach tomograficznych, to czy nie można by pójść o krok dalej i nauczyć sieć rozpoznawania docelowych obrysów kości? Ułatwiłoby to znacznie dalszy etap tworzenia modelu tkanki kostnej,

ponieważ nie byłoby potrzebne zastosowanie metod detekcji punktów na powierzchniach struktur kostnych.

4. W rozdziale trzecim omówiono bardzo ciekawą autorską metodę morfingu wykorzystującą linię szkieletową modelowanych obiektów do odpowiedniego przekształcenia współrzędnych punktów. Jednak z treści pracy wynika, że metoda ta nie została wykorzystana docelowo do tworzenia modelu trójwymiarowych kości miednicy (zastosowano algorytm CPD). Skoro jednak wykazano, że metoda ta prowadzi do dokładniejszego modelowania wybranych kształtów w porównaniu do algorytmu PDF, to proszę o wyjaśnienie, czy w związku z tym Autorka widzi jakieś zastosowania dla opracowanej metody, czy też jednak ze względu na zidentyfikowane ograniczenia nie nadaje się ona do tworzenia modeli trójwymiarowych kości.

Inna moja uwaga dotyczy niejasnej zawartości rys. 3.9a-c, gdzie pokazano wykryte punkty reprezentujące kości. Nie wiadomo jednak, czy legenda rysunku odnosi się punktów zaznaczonych kolorem białym czy czerwonym. Z kolei na rys. 3.9d oraz 3.10d nie widać wspólnych punktów charakteryzujących wykryte fragmenty kości.

Wszystkie moje uwagi krytyczne i dyskusyjne w żadnym stopniu nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę recenzowanej pracy, której zakres mieści się w dyscyplinie informatyka. Stwierdzam, że praca „Automatyczne metody tworzenia trójwymiarowych zindywidualizowanych modeli szkieletów z wykorzystaniem morfingu” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz wnioskuję o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Zuzanny Krawczyk do publicznej obrony.

MW SFLW

