

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. Pawła SKADŁUBOWICZA
pt. *Komputerowe modelowanie i rekonstrukcja struktur kostnych miednicy*

1. Zakres i cel rozprawy

Rozwój skomputeryzowanych technik i metod obrazowania medycznego, a w szczególności obrazowania przestrzennego, dostarcza lekarzowi nowych i coraz doskonalszych narzędzi poznawczych, umożliwiających nie tylko skuteczną diagnostykę, ale pozwalających także na prowadzenie wirtualnych operacji, a w fazie planowania zabiegu chirurgicznego, na wybór najlepszego jego wariantu, dostosowanego do anatomii pacjenta. Jednocześnie, techniki te generują nowe, trudne problemy badawcze związane z koniecznością zaawansowanego przetwarzania zgromadzonej informacji obrazowej. Wśród etapów takiego przetwarzania znaczącą rolę odgrywa zadanie detekcji określonych struktur anatomicznych, której wynik obejmujący geometrię, lokalizację, czy konfigurację tych struktur, może służyć jako podstawa do analizy obrazu na wyższym poziomie, obejmującej zadania rozpoznawania i rozumienia obrazu medycznego, a także do oceny jego semantycznej zawartości.

Recenzowana rozprawa, która należy do dziedziny komputerowego przetwarzania informacji obrazowej ukierunkowanego na przestrzenne obrazowanie medyczne, dotyczy problematyki budowy powierzchniowych modeli reprezentujących struktury kostne miednicy człowieka. Zadanie to ma duże znaczenie społeczne, gdyż stosowane w praktyce klinicznej umożliwia np. przestrzenną rekonstrukcję fragmentu kości miednicy przeznaczonego do resekcji, w celu zaprojektowania implantu możliwie najlepiej dostosowanego do kształtu kości, którą ma zastąpić.

Tematykę rozprawy uważam za w pełni uzasadnioną, interesującą i aktualną dla współczesnych prac z zakresu komputerowych metod modelowania przestrzennego wybranych struktur anatomicznych i ważną dla rozwoju metodologii cyfrowego przetwarzania medycznej informacji obrazowej, a samą pracę za udaną próbę wzbogacenia możliwości i skuteczności procedur przetwarzania obrazów tomografii komputerowej ukierunkowanych na rekonstrukcję określonego obszaru anatomicznego.

2. Zawartość rozprawy

Opiniowana praca składa się z 5 rozdziałów, zestawienia rysunków i tabel, jednego dodatku oraz spisu literatury zawierającego 102 pozycje i obejmuje 99 stron maszynopisu. We wstępie przedstawiono motywację podjęcia tematu rozprawy, zaprezentowano przykłady zastosowania metody statystycznych modeli kształtu w różnorodnych praktycznych zadaniach

oraz na szeroko nakreślonym tle literaturowym sformułowana została teza i cele pracy. Rozdział 2 obejmuje przegląd metod stosowanych do rekonstrukcji struktur kostnych miednicy. Metody te obejmują rekonstrukcje biologiczne w oparciu o tkanki ludzkie pochodzące z innej części ciała lub innego pacjenta oraz rekonstrukcje z zastosowaniem implantów wyprodukowanych z biozgodnych materiałów. Rozdział 3 został poświęcony metodzie rekonstrukcji struktur kostnych miednicy z zastosowaniem statystycznego modelu kształtu, która jest kluczowa dla sformułowanej tezy pracy. W rozdziale tym, zawierającym również oryginalne wyniki autora, przedstawiono ideę metody i związane z nią definicje, opisano procedury identyfikacji (segmentacji) kostnych struktur anatomicznych w zbiorze obrazów pochodzących z tomografii komputerowej (CT), dokonano przeglądu metod do automatycznego wyznaczania relacji pomiędzy obiektami reprezentującymi te same struktury anatomiczne na różnych obrazach, prezentując na tym tle metodę autorską oraz przedstawiono kolejne kroki procedury wyznaczania modelu statystycznego miednicy. Rozdział podsumowuje opis złożonego algorytmu wyznaczania anatomicznie zgodnego kształtu implantu (tzw. wirtualna rekonstrukcja struktur kostnych) w oparciu o wygenerowany model statystyczny dla odpowiednio określonego zestawu parametrów. W rozdziale 4 ujęta została analiza i ocena opracowanych metod rekonstrukcji miednicy opartej na statystycznym modelu kształtu. Przedstawione tutaj wyniki obejmują ocenę rekonstrukcji obszarów dla dwóch stosowanych rodzajów osteotomii miednicy pod względem jakości dopasowania i czasów obliczeń, a także rezultaty porównania z powszechnie stosowaną w rekonstrukcji kształtu metodą lustrzaną. Pracę podsumowuje rozdział 5, w którym przedstawiono syntetyczne wnioski wynikające z realizacji rozprawy oraz sugestie dalszych prac zmierzających do poprawy opracowanych metod i algorytmów. W dodatku przedstawiono szczegóły anatomiczne budowy miednicy, ze szczególnym uwzględnieniem jej asymetrii, co między innymi ogranicza możliwości metody lustrzanej.

Przedstawiona rozprawa prezentuje najważniejsze rezultaty objęte jej tematyką w logicznym układzie oraz w szerokim kontekście aktualnego stanu wiedzy w zakresie komputerowego modelowania kości miednicy i ich rekonstrukcji. Na szczególnie pozytywne podkreślenie zasługuje dbałość o wysoki poziom edytorski oraz bogata i staranna strona graficzna obejmująca liczne ilustracje przedstawiające w wygodnej formie wyniki badań eksperymentalnych oraz w poglądowym ujęciu szczegóły anatomiczne struktur kostnych miednicy i rezultaty ich rekonstrukcji. Chociaż ogólnie zakres pracy i sposób ujęcia materiału oceniam pozytywnie, to należy tu wnieść uwagę krytyczną dotyczącą momentami zbyt pobieżnego i mało precyzyjnego opisu stosowanych metod badawczych, toku prowadzonego wywodu oraz uzyskanych rezultatów. Wynika to między innymi z faktu, że charakterystyka słowna przeważa nad formalizmem matematycznym, co powoduje, że wiele istotnych pytań pozostaje bez odpowiedzi – będzie o tym mowa w dalszej części recenzji.

3. Uzyskane wyniki

Celem pracy było wykazanie następujących tez (cyt.):

1. *Metoda rekonstrukcji kości miednicy oparta na statystycznym modelu kształtu może być pomyślnie zastosowana w przypadkach, w których nie jest możliwe zastosowanie metody odbicia zwierciadlanego,*
2. *Zastosowanie statystycznego modelu kształtu daje rezultaty tej samej klasy jakości co metoda odbicia zwierciadlanego. Poprzez tą samą klasę jakości rozumiane jest uzyskanie rezultatów, których różnice nie mają wpływu na końcowy wynik rekonstrukcji chirurgicznej.*

Wykazanie prawdziwości tezy wymagało od doktoranta opracowania całościowej metody rekonstrukcji kości miednicy w oparciu o model statystyczny oraz przeprowadzenia badań eksperymentalnych, które pozwoliłyby na weryfikację tezy rozprawy. Tak więc, realizacja

sformułowanego celu doprowadziła do szeregu szczegółowych i konkretnych osiągnięć, które można ująć w następujące punkty:

1. Utworzenie zbiorów treningowego i testowego. W pierwszej kolejności utworzony został 234 elementowy zbiór obrazów przestrzennych zawierających kości udowe, kości miednicy i kość krzyżową reprezentowane przez trójkątne siatki powierzchni wygenerowane na podstawie sekwencji obrazów CT. Wydzielenie struktur kostnych na obrazach CT zostało wykonane metodą dwuetapowej segmentacji (etap wstępny realizowany metodą rozrostu obszarów i połączonej pewności oraz etap segmentacji dokładnej poprzez ręczną separację wydzielonych struktur kostnych), a następnie wysegmentowane obszary zostały wypełnione z zastosowaniem autorskiej modyfikacji rekurencyjnego algorytmu rozrostu ziarna. Kolejny krok wykonany na podstawie sekwencji wysegmentowanych kości polegał na wygenerowaniu przestrzennego obrazu tkanek kostnych reprezentowanego modelem powierzchniowym złożonym z siatek trójkątów. Krok ten wykonano z wykorzystaniem algorytmu maszerujących sześcianów. Aby poprawić jakość wygenerowanej siatki trójkątów, stosowane zostały dalsze kroki przetwarzania: oczyszczenie błędów w strukturze siatki (usunięcie wielokątów niezwiązanych z siatką), wygładzanie (usunięcie „schodów” na powierzchni związanych z grubością przekroju tomograficznego), dziesiątkowanie (usunięcie wybranych punktów bez utraty szczegółów powierzchni), reorganizacja struktury siatki (równomierne rozłożenie wielokątów siatki). Po odrzuceniu obrazów zawierających niepożądane zmiany (złamania, protezy, przesunięcie stawu biodrowego) otrzymano 180 obrazów przestrzennych, z których 80 zostało wykorzystane do wygenerowania modelu statystycznego miednicy (zbiór uczący), a pozostałe 100 stanowiło zbiór testujący służący do oceny opracowanego algorytmu.
2. Opracowanie algorytmu wyznaczania odpowiedniości pomiędzy obrazami zbioru uczącego. Uzyskane siatki powierzchni kości dla poszczególnych pacjentów nie są zgodne, gdyż struktura każdej siatki może być inna, dlatego nie jest możliwa bezpośrednia analiza statystyczna wyznaczonych kształtów w celu budowy modelu statystycznego. Aby to umożliwić opracowany został algorytm ustalenia relacji pomiędzy miednicami, aby obraz powierzchniowy każdej z nich składał się z tej samej liczby odpowiadających sobie punktów. W tym celu, w pierwszej kolejności następuje wykadrowanie binarnych masek wolumetrycznych, tak aby obszar każdej maski zawierał wyłącznie woksele struktur kostnych, przez co uzyskujemy współrzędne zbioru wolumetrycznego i jego rozmiar. Następnie przez lekarza-eksperta wybierana jest jedna maska, która stanowi najlepszą anatomiczną reprezentację miednicy. Kryteria wyboru, to brak patologii w budowie kości, możliwie mała liczba indywidualnych zniekształceń oraz wymóg, aby geometria wybranej miednicy sytuowała się blisko średniej wszystkich masek danej kategorii (lewa i prawa strona miednicy, kobieta i mężczyzna). W kolejnym kroku następuje elastyczne dopasowanie pozostałych obrazów miednic do wybranego wzorca. Zastosowana została tutaj metoda B-splajnowej elastycznej transformacji. W metodzie tej generowane jest pole deformacji z przypisanym każdemu punktowi wektorem deformacji. Wektory deformacji obliczane są z użyciem B-sklejanej interpolacji wartości punktów zlokalizowanych w zgrubnej siatce (tzw. B-sklejana siatka). Dopasowanie do wzorca uzyskuje się poprzez procedurę optymalizacyjną przesuwania punktów kontrolnych na obrazie dopasowywanym. Realizacja powyższych kroków prowadzi do identycznej struktury powierzchni (powierzchnie z tą samą liczbą odpowiadających sobie punktów) wszystkich obiektów uczących, co umożliwia analizę statystyczną kształtu kości miednicy wchodzących w skład zbioru uczącego.
3. Zaproponowanie metody optymalizacji pozwalającej na znalezienie najlepszego dopasowania modelu statystycznego do rekonstruowanego kształtu kostnej struktury

anatomicznej miednicy. Przyjętą tu metodą jest iteracyjna procedura zwana strategią ewolucyjną ($\mu+\lambda$), w której w kolejnym kroku z populacji rodzicielskiej P złożonej z μ osobników tworzy się tymczasową populację T złożoną z λ osobników ($\mu \leq \lambda$) poprzez reprodukcję (losowanie ze zwracaniem). Następnie osobniki populacji T podlegają operacjom krzyżowania i mutacji, w wyniku czego powstaje populacja potomna O również złożona z λ osobników. Ostatnim działaniem jest wybór μ najlepszych osobników z obu populacji P i O , które będą stanowiły populację rodzicielską P w następnej iteracji. Przyjęty warunek stopu, to 300 iteracji lub brak zmiany populacji w 5 kolejnych iteracjach.

4. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych umożliwiających ocenę uzyskanych wyników i ich analizę porównawczą z wynikami metody lustrzanego odbicia zdrowej kości miednicy. Podstawą przeprowadzonych badań było 180 rzeczywistych obiektów (trójwymiarowych rekonstrukcji miednic utworzonych na podstawie przekrojowych obrazów CT) podzielonych na 4 kategorie (mężczyźni, kobiety, lewa i prawa połowa miednicy) i tworzących dwie grupy: 80-cio elementowy zbiór uczący oraz zbiór testujący zawierający 100 obiektów. Ponieważ praktycznym efektem pracy jest opracowanie narzędzia do wyznaczenia kształtu implantu najlepiej dopasowanego do anatomii rekonstruowanego fragmentu miednicy, dlatego badania przeprowadzono dla dwóch zasymulowanych obszarów resekcji: osteotomii okołostawowej, w której usunięciu podlega tkanka kostna otaczająca panewkę stawu biodrowego oraz potrójnej osteotomii miednicy, kiedy miednica dzieli się na 3 oddzielne części. W obu przypadkach wyznaczano na podstawie 100 obiektów testujących jakość dopasowania modelu statystycznego oraz czas obliczeń w funkcji liczby składowych głównych modelu. Porównywano także dla obu resekcji jakość dopasowania modelu statystycznego oraz modelu lustrzanego w rozbiciu na 4 wymienione kategorie. We wszystkich przypadkach model lustrzany okazał się nieznacznie lepszy, ale występujące różnice – zdaniem autora – nie wpływają na wynik rekonstrukcji chirurgicznej, co oznacza, że teza pracy została wykazana.

4. Uwagi szczegółowe

W recenzowanej rozprawie dostrzega się usterki, które można ująć w następujące punkty:

1. Niezbyt szczęśliwie w tezie rozprawy zostało sformułowane pojęcie *tej samej klasy jakości* jako rezultaty, których różnice nie mają wpływu na końcowy wynik rekonstrukcji chirurgicznej. Jest to określenie subiektywne i nie daje żadnej możliwości dyskusji ze stwierdzeniem w rozdziale 5, iż (cyt.) *Z klinicznego punktu widzenia opracowana metoda daje tej samej klasy jakości wyniki jak metoda lustrzana*, a więc, że teza pracy została wykazana. Powstaje pytanie, jak duże (w milimetrach) musiałyby być różnice pomiędzy wynikami obu metod, aby uznać, że nie stanowią rezultatów tej samej klasy jakości? Autor mógł tego problemu unikać, gdyby przyjął właściwy formalizm w interpretacji wyników eksperymentalnych analiz porównawczych. Standardem w takich badaniach jest analiza statystyczna wyników, która – w rozpatrywanym przypadku – może sprowadzać się do weryfikacji hipotezy (na przyjętym poziomie istotności) o braku statystycznej różnicy pomiędzy wynikami obu metod. Tak więc, w tezie powinno pojawić się sformułowanie, iż różnice w wynikach obu porównywanych metod są statystycznie nieistotne, a wyniki badań eksperymentalnych powinny zostać zweryfikowane odpowiednimi testami statystycznymi.
2. W badaniach eksperymentalnych dla symulowanych osteotomii oceniano jakość dopasowania modelu statystycznego do powierzchni rekonstruowanej. Ponieważ – jak należy się domyślać – nie dysponowano obiektem fizycznym, dlatego przez powierzchnię rekonstruowaną należy rozumieć zapewne (bo nie zostało to nigdzie napisane) model

powierzchniowy zbudowany na podstawie skanów CT metodą sześcianów kroczących. Tak więc, jakość dopasowania oceniano na podstawie porównania dwóch modeli – pierwotnego uzyskanego bezpośrednio ze skanów CT i wtórnego, zbudowanego poprzez optymalizację procesu deformacji średniego modelu statystycznego uzyskanego na podstawie zbioru uczącego. Takie postępowanie ma sens jedynie wtedy, gdy nie jest dostępny fragment miednicy, który ma być zastąpiony implantem (np. został już wcześniej usunięty, lub jest tak zniekształcony chorobą nowotworową, że nie można bezpośrednio odtworzyć jego kształtu). W przeciwnym razie nie trzeba odwoływać się do modelu statystycznego, ale wprost można skorzystać z indywidualnego modelu bezpośredniego. Badanie jakości dopasowania winno zatem wyglądać następująco: model statystyczny zbudowany na podstawie zbioru uczącego powinien być dopasowany (z zastosowaniem strategii ewolucyjnej) do miednicy rekonstruowanej (czytaj: modelu miednicy rekonstruowanej), ale wyłącznie w obszarze dostępnym z założenia (czyli bez fragmentu, który będzie zastąpiony implantem), a następnie ocena jakości tak dopasowanego modelu powinna się odbyć wyłącznie w obszarze kości usuniętej w wyniku resekcji.

3. Wykorzystanie strategii ewolucyjnych w zadaniu rekonstrukcji struktur kostnych na podstawie statystycznego modelu kształtu jest – jak się wydaje – jednym z ciekawszych rezultatów pracy. Niestety, brak szczegółów w opisie nie pozwala ocenić poprawności procedury i – co bardzo ważne – odpowiedzieć na pytanie, czy autor wykorzystał wszystkie możliwości, jakie daje zastosowana strategia ewolucyjna ($\mu+\lambda$) w poszukiwaniu najlepszego rozwiązania. Z dwustronicowego opisu dowiadujemy się, kiedy zostały opracowane strategie ewolucyjne, kim są autorzy, na jakiej uczelni pracują, i jakie formy metoda przybiera, a nic nie wiemy na temat postaci przyjętej funkcji celu i jej jawnej zależności od zmiennych optymalizujących, mechanizmu losowania populacji początkowej, nie znamy postaci chromosomu (w szczególności nie wiemy, czy zawiera on tylko zmienne optymalizujące, czy także wektor odchyłeń standardowych z gaussowskiej procedury mutacji), nie wiemy co to są punkty rekonstruowanej powierzchni w (14) (rekonstruujemy wszak rzeczywistą miednicę), czy wykorzystano możliwości samoadaptacji procesu mutacji, czy zastosowano także krzyżowanie, a jeśli tak, to jakie (wbrew temu, co pisze autor, w algorytmie ($\mu+\lambda$) stosuje się krzyżowanie (np. poprzez wymianę genów lub ich uśrednienie)).
4. W metodzie PCA, na którą autor się powołuje, i -ta składowa główna, to unormowana kombinacja liniowa źródłowej obserwacji cech obiektu oraz wektora własnego, odpowiadającego i -tej (według malejącego porządku) wartości własnej macierzy kowariancji C (8). Jak wynika z opisu na str. 45, i -ty wektor własny, to λ_i . Z kolei wzory (10) i (11), aby miały sens, oznaczają, że λ_i to skalar – istotnie, w komentarzu na str. 48 określono λ_i jako wartość własną macierzy C . Autor jest proszony o wyjaśnienie, która z interpretacji wielkości λ_i i w konsekwencji, które z formuł ((9) czy (10) i (11)) są prawdziwe.
5. Co to są parametry deformacji D_i (str. 45) – w rozdziale poprzednim, gdzie była opisywana procedura deformacji kształtu symbol ten się nie pojawił. Z (9) wynika, że D_i jest macierzą, natomiast nierówności poniżej sugerują, że jest to skalar.
6. Formuła (9) jest kluczowa dla wyznaczania modelu dla poszczególnych obiektów uczących. Brakuje uzasadnienia jej interpretacji.
7. W spisie literatury zabrakło jednej z ważniejszych pozycji książkowych, bardzo blisko związanej z tematyką rozprawy. Jest to książka Prof. Pawła Drapikowskiego z Politechniki Poznańskiej pt. *Komputerowe modelowanie przestrzenne w diagnostyce medycznej i wspomaganie planowania operacji* (Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010). Znaczący zakres treściowy książki jest poświęcony metodom

- rekonstrukcji przestrzennych (budowa modeli powierzchniowych na podstawie danych wolumetrycznych), analizie i wizualizacji błędów modeli powierzchniowych oraz zastosowaniu opracowanych modeli w medycynie (także do wykonania modeli fizycznych na podstawie komputerowych modeli powierzchniowych (również kości miednicy)). Przeoczenie przez doktoranta wymienionej książki mocno zubaża kontekst literaturowy rozprawy i świadczy o dość niestarannym przeglądzie literaturowym.
8. Niezbyt fortunne określenie metod (w tym metody autorskiej) opisanych w rozdziale 3.4 jako metod ustalania zgodności (korespondencji?) pomiędzy obiektami uczącymi. Chodzi tutaj przecież jedynie o wyznaczenie wspólnej jednakowej (spójnej) reprezentacji geometrii powierzchni miednic, co jest konieczne do budowy modelu statystycznego. Jest to zatem unifikacja opisu, a nie wyznaczanie jakiejś relacji pomiędzy miednicami ze zbioru uczącego.
 9. Brak informacji nt. zbioru obrazów CT, które były podstawą do przeprowadzonych badań (jaki aparat był stosowany, jaka była rozdzielczość skanów, jaki był odstęp pomiędzy skanami, ile skanów składało się na jedno badanie).
 10. Skoro do dyspozycji było, oprócz 80 obiektów uczących, 100 obiektów testujących (str. 20), to dlaczego w badaniach stosowana była metoda *leave-one-out* (str.51)?
 11. Problem wyznaczenia miary podobieństwa (odległości) pomiędzy powierzchniami został w pracy sprowadzony do wyboru metryki (np. euklidesowa, Mahalanobisa, itp.) i jej wykorzystaniu do wyznaczenia odległości pomiędzy wybranymi punktami powierzchni. W efekcie pojawiają się takie nieprecyzyjne sformułowania jak (cyt.) *wyznaczenie średniej odległości każdego punktu z powierzchni wycinka kości do najbliższego trójkąta siatki powierzchni miednicy zrekonstruowanej* (str. 59, 66). Przecież punktów na powierzchni wycinka kości jest nieskończenie wiele. Jak np. dla przyjętej normy euklidesowej wyznaczyć odległość punktu od trójkąta i co to znaczy najbliższy trójkąt? Bardzo ciekawa dyskusja tego problemu wraz z propozycjami miar podobieństwa pomiędzy powierzchniami, które nie sprowadzają powierzchni do zbioru punktów, można znaleźć w przytoczonej wyżej książce prof. Drapikowskiego.
 12. Jaka jest różnica pomiędzy reprezentacją kształtu (np. w formie tablicy (2) na str. 22), a modelem rozkładu punktów (model rozkładu punktów jest – według definicji – wzorcem obiektu, w którym kształt jest reprezentowany w postaci zbioru etykietowanych punktów, a więc np. także w formie tablicy (2)).
 13. Wyniki pracy byłyby mocniejsze, gdyby autor opracował automatyczną procedurę wyboru maski-wzorca zamiast ręcznego wyboru przez eksperta. Wydaje się to nietrudne wobec dość jasno opisanych kryteriów takiego wyboru. W szczególności wymóg, aby wielkość miednicy sytuowała się pośrodku wszystkich masek (wartość średnia? środkowa?) jest stosunkowo łatwy do formalizacji.
 14. Jaka jest różnica pomiędzy metodą opisaną w punkcie 3.4.1, a metodą autorską poza inną procedurą dopasowania powierzchni wzorca do powierzchni miednic ze zbioru uczącego?
 15. Dlaczego – jak twierdzi autor (str. 33) – powszechnie stosowane metody unifikacji siatek miednic w zbiorze uczącym nie mogą być stosowane do budowy statystycznego modelu kształtu miednicy (przecież jedna z nich była stosowana we wcześniejszych pracach doktoranta)?
 16. Niejasny wzór (5). Po lewej stronie występuje wektor w punkcie (x,y,z) trójwymiarowej przestrzeni. Po prawej stronie nie ma wielkości wektorowej (chyba, że jest nią wielkość Φ opisana jako punkt kontrolny (?)) i nie ma również współrzędnych (x,y,z) .
 17. Sprzeczne opisy procedury dopasowywania. Na str. 36 jest ona określona, jako elastyczne dopasowywanie wszystkich miednic z obrazów uczących (obrazy ruchome) do

statycznego wzorca. Z kolei na str. 40 jest mowa o tym, iż deformacji (dopasowywaniu) podlega kształt powierzchni miednicy wzorcowej.

18. Z przytoczonych definicji specyficzności i uogólnienia (str. 48-49) wynika, że wzajemnie się wykluczają. Która zatem z tych dwóch własności modelu jest bardziej pożądana?
19. Rozmiar zbioru treningowego to m (str. 45) czy n (str. 51)?
20. Błędy językowe: *poprzez tą samą klasę* (str. 14), ...*powierzchnia jest dopasowywana* *stosując w tym celu* (str. 31), ...*pomiędzy oba obrazami* (str. 36), *Zbiór* *poddawany jest analizie* *stosując* ... (str. 44).

5. Podsumowanie recenzji – ocena rozprawy

Reasumując stwierdzam, iż Pan mgr Paweł Skadłubowicz wykazał się dużą wiedzą z zakresu obrazowania medycznego, modelowania przestrzennego oraz metod cyfrowego przetwarzania informacji obrazowej, a także opanowaniem i właściwym posługiwaniem się odpowiednim warsztatem badawczym. Przedstawiona praca zawiera poprawnie sformułowany i rozwiązany problem badawczy oraz stanowi wartościowy wkład w dziedzinę komputerowego powierzchniowego modelowania struktur anatomicznych i jego zastosowania we wspomaganie planowania zabiegów chirurgicznych. Zawarte w niej rezultaty obejmujące algorytmy budowy modelu statystycznego kości miednicy oraz ich eksperymentalne badanie i analizę porównawczą z metodą modelowania lustrzanego, są oryginalne i zostały przedstawione w logicznym układzie i całościowym ujęciu. Uważam, że praca doktorska Pana mgr. Pawła Skadłubowicza spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez odpowiednią Ustawę i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

M. Kuryś