



Dr hab. inż. Jerzy Małachowski, prof. nadzw. WAT

Warszawa, 26.08.2013 r.

Tel.: +48 22 6839683

E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

WWW: <http://kmiis.wme.wat.edu.pl/>

Recenzja

rozprawy doktorskiej pt. „Komputerowe wspomaganie zabiegu alloplastyki stawu biodrowego człowieka” napisanej przez mgra inż. MATEUSZA DUDĘ

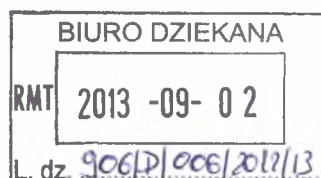
1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo Dziekana Wydziału Mechaniczno-Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach prof. dra hab. inż. ARKADIUSZA MEŻYKA podyktowane decyzją Rady Wydziału z dnia 10 lipca 2013 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. MATEUSZA DUDY pt. *Komputerowe wspomaganie zabiegu alloplastyki stawu biodrowego człowieka*. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. ANTONI JOHN, prof. nzw. Politechniki Śląskiej.

2. Omówienie pracy

Recenzowana praca została napisana na 168 stronach maszynopisu formatu A4; składa się z 7 rozdziałów, dodatku, wykazu cytowanej literatury oraz dwóch streszczeń w języku polskim i angielskim. Rozprawa w całości napisana jest w języku polskim. Rozprawa zawiera 105 rysunków, 39 tabel i 72 wyrażen matematycznych. Spis literatury zawiera 185 pozycji, w tym 2 pozycji z udziałem Doktoranta. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wprowadzenie; (2) Podstawowe informacje o stawie biodrowym człowieka; (3) Podstawowe informacje o tomografii komputerowej; (4) Metodyka tworzenia modeli numerycznych; (5) Modelowanie struktury tkanki kostnej; (6) Analiza stawu biodrowego przed i po operacji alloplastyki; (7) Podsumowanie rozprawy; Dodatek A; Bibliografia; Streszczenie.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra inż. Mateusza Dudy jest komputerowa metoda umożliwiająca poprawne stworzenie modelu numerycznego układów biomechanicznych, ze szczególnym uwzględnieniem modelowania niejednorodnej dystrybucji materiału bez potrzeby użycia ilościowej tomografii komputerowej. Wykorzystując swoje doświadczenie oraz zdobytą wiedzę o obiekcie badawczym i tomografii komputerowej, w trakcie realizacji powyższej pracy sformułował następującą tezę: **„Przedstawiona metodyka tworzenia modeli numerycznych umożliwia wykonanie dokładnego modelu numerycznego dla dowolnego stanu anatomicznego układu biomechanicznego, a jednoczesne zastosowanie wolumetrycznego podejścia do modelowania niejednorodnej dystrybucji parametrów materiałowych pozwala zasymulować dowolny stan fizjologiczny struktur kostnych.”**. Do udowodnienia tej tezy Doktorant jako



obiekt badawczy wybrał staw biodrowy zarówno dla stanu przedoperacyjnego, jak po zabiegu endoprotezoplastyki oraz kapoplastyki.

3. Omówienie zakresu rozdziałów i uwagi

Rozdział 1. Wprowadzenie (6 stron)

Autor dokonuje wprowadzenia w tematykę rozprawy doktorskiej definiując obszar problemowy prowadzonych przez siebie badań oraz podaje czynniki motywujące do podjęcia tematyki badawczej zaprezentowanej w pracy. W podsumowaniu tego rozdziału stawia tezę oraz definiuje zakres prowadzonych badań pozwalających udowodnić ją. Dodatkowo zostały bardzo dokładnie przedstawione cele cząstkowe, które pozwalają Autorowi ww. tezę dowieść.

Rozdział 2. Podstawowe informacje o stawie biodrowym człowieka (12 stron)

Dzięki temu rozdziałowi Doktorant, opierając się na przeglądzie literaturowym, dokonuje wprowadzenia w problematykę budowy i funkcjonowania stawu biodrowego człowieka. Wyróżnia w tym opisie zarówno część czynną (mięśnie szkieletowe), jak też część bierną (kości, stawy, więzadła). Na podkreślenie zasługuje bardzo rzetelny opis bazujący na szerokim przeglądzie specjalistycznej literatury medycznej i publikacji biomechanicznych wydanych w kraju oraz za granicą. Jediną uwagę jaką należy zgłosić to fakt, że przy opisie Autor powinien stosować obowiązujący system miar i jednostek, tzn. w następującym sformułowaniu „Ze względu na fakt, iż ciśnienie w panewce stawu biodrowego na 1cm^2 wynosi około 10N, to jak łatwo obliczyć, całościowe ciśnienie działające na staw biodrowy wynosi ok. 160N.” należy używać jednostek przypisanych wielkości ciśnienia, tj. Pascal lub pochodnych typu kPa lub MPa. Część rysunków wymaga też lepszej prezentacji graficznej z uwagi na zastosowaną zbyt niską rozdzielczość skanowania, np. rys. 2.3 i 2.6b.

Rozdział 3. Podstawowe informacje o tomografii komputerowej (15 stron)

Rozdział ten jest o tyle ważny, że jak pisze Doktorant „Podstawą analizy układów biomechanicznych jest model oddający cechy fizyczne oraz geometrię układu. W procesie tworzenia modelu możemy wyróżnić dwie fazy: tworzenie modelu geometrycznego oraz tworzenie modelu numerycznego. Do budowy modelu geometrycznego stosuje się obecnie przetworzone dane tomograficzne lub pochodzące z rezonansu magnetycznego. Podejście takie charakteryzuje się tym, że tworzona geometria odwzorowuje cechy układu dla pojedynczego człowieka, a więc przeprowadzone obliczenia i ich analiza oraz interpretacja jest dedykowana tylko dla jednego pacjenta. Implikuje to jednakże automatycznie cechę dotyczącą zasięgu obliczeń do jednej osoby...” i dalej „Podejście takie jest bardzo korzystne w planowaniu implantacji protez, ale przede wszystkim w budowie indywidualnej protezy. Możliwe jest zaprojektowanie protezy o kształcie optymalnym tj. przenoszącym w pożądanym sposób obciążenia oraz pasującym do architektury układu szkieletowego danego pacjenta.” Doktorant, w związku z powyższymi faktami, omawia problematykę związaną z obrazowaniem cyfrowym, podstawowe metody rekonstrukcji obrazu (sumacyjną, iteracyjną oraz analityczną) w tomografii komputerowej oraz powszechnie stosowany w medycynie format DICOM. Przedstawione w tym rozdziale treści poparte zarówno opisem fizycznym i matematycznym stanowią dla Doktoranta podstawę do realizacji kolejnego etapu badań zaprezentowanego w rozdziale następnym. Przedstawiona w rozdziale wiedza bazuje na wykonanym przez Autora fachowym przeglądzie specjalistycznej literatury z zakresu obrazowania medycznego.

Rozdział 4. Metodyka tworzenia modeli numerycznych (29 stron)

Rozdział ten należy uznać za jeden z podstawowych rozdziałów pracy, w której Autor prezentuje tematykę związaną z tworzeniem modeli geometrycznych, a następnie numerycznych modelowanych elementów miednicy i kości udowej. W rozdziale tym zawarte są następujące podrozdziały: akwizycja oraz przetwarzanie danych, budowa siatki elementów trójkątnych – potocznie określana procesem triangulacji, modelowanie powierzchniowe tzn. opis utworzonych siatek trójkątnych powierzchniami typu NURBS, modelowanie bryłowe (CAD) i następnie budowa modeli MES. Wszystkie te kroki Doktorant wykonał z wykorzystaniem zaawansowanym programów komputerowych do analizy obrazów DICOM i ich przetwarzania w kolejnych etapach, aż do uzyskania modeli dyskretnych MES. W ten sposób potwierdził umiejętność profesjonalnej pracy w tak wielu środowiskach programowych oraz umiejętność ich połączenia. Do wykorzystywanych inżynierskich systemów komputerowych należy zaliczyć np. systemy 3Matic, IronCAD, Mimics, MSC.Patran. W swoich kolejnych etapach omawia procedury postępowania w każdym ze środowisk z dyskusją szeregu parametrów, które znacząco mogą wpłynąć na jakość otrzymywanych modeli, jak też i filtrów, które są niezbędne do obróbki obrazów. Na podkreślenie zasługuje także zaproponowany własny oryginalny schemat tworzenia modeli numerycznych zaprezentowany na rys. 4.2.

Uwagi. Pomimo tak szczegółowych analiz i badań, Autor nie uniknął pewnych niedociągnięć lub też zastosował zwroty wymagające wyjaśnień, tj.:

- 1) Co Autor miał na myśli używając stwierdzenia: „W tym celu z optymalizowanego modelu siatki elementów trójkątnych utworzono maskę ..” (strona 48), „Kolejnym narzędziem zastosowanym w optymalizacji siatki był filtr elementów trójkątnych ze względu na małe trójkąty (opcja small triangle reduction).” (strona 49), „W programie istnieje możliwość optymalizacji siatki lokalnie.”, itp., nie definiując zastosowanych metod optymalizacji. Słowo optymalizacja jest często używane przez Autora, co wymaga jednak bardziej szerszego opisu za każdym razem, ze szczególnym podkreśleniem, jaki to był rodzaj optymalizacji (jedno czy wielokryterialna) i jak dokładnie wyglądały przyjęte kryteria.
- 2) Autor nie określił, jaki poziom tolerancji należy uznać za zadowalający przy tworzeniu siatek analizowanych struktur kostnych (strona 49).
- 3) W opinii Recenzenta uszczegółowieniu wymaga także stwierdzenie „Przedostatnim etapem jest zamodelowanie siatki powierzchni NURBS poprzez narzucenie ilości punktów kontrolnych oraz ewentualnie korekty położenia niektórych z nich.” Tego typu wiadomości lub kryteria, jakimi należy się kierować są bardzo użyteczne i kolejnym badaczom w sposób znaczący pozwalają uniknąć szeregu błędów i znacząco skrócić czas dochodzenia do wyników badań.
- 4) Na stronie 66 (rys. 4.27) Recenzent sugeruje dokonać uzupełnienia i opisać modelowane siatką dyskretną elementy stawu biodrowego.

Rozdział 5. Modelowanie struktury tkanki kostnej (48 stron)

Rozdział ten, biorąc pod uwagę jego obszerność z uwagi na ilość analizowanych aspektów oraz otrzymanych wniosków badawczych, w opinii Recenzenta stanowi główny punkt rozprawy. Doktorant porusza w tym rozdziale takie kwestie jak: właściwości mechaniczne i parametry materiałowe tkanki kostnej, model matematyczny materiału kości zbitej oraz gąbczastej, zaproponowaną metodykę modelowania rozkładu niejednorodnego oraz modelowanie połączenia kość gąbczasta – kość korowa. Wszystkie te rozdziały wpisują się w główny cel rozprawy, a mianowicie wypracowanie całościowej metody pozwalającej poprawnie modelować struktury kostne. Na uwagę zasługuje bardzo duży wysiłek włożony

przez Doktoranta na umiejętne wypracowanie metody modelowania numerycznego części korowej i gąbczastej kości, co jak wiemy mając na względzie duży poziom złożoności tych struktur zarówno od strony własności geometrycznych, jak też silnych niejednorodności mechanicznych, należy do zadań niełatwych. Doktorant, realizując ten punkt pracy bardzo umiejętnie posiłkował się istniejącymi modelami i wynikami literaturowymi. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że przedstawił także własną propozycję modelowania rozkładu niejednorodnego tkanek kostnych, która jednocześnie zapewniałaby konkretną założoną wartość modułu Younga E w obrębie całej modelowanej struktury lub jej dowolnego segmentu zapewniając jednocześnie niejednorodną dystrybucję parametrów materiałowych w określonej opisywanej objętości. Rozkłady parametrów w przestrzeni geometrycznej np. względem układu współrzędnych związanego z opisem geometrii jakiegokolwiek wycinka kości lub całej kości nie były przez Autora rozważane. Jak sam Doktorant stwierdził na podstawie dokonanych analiz literaturowych, w wielu przypadkach „...przeglądając literaturę napotyka się wciąż prace, w których materiał kości jest modelowany jako np. izotropowy i jednorodny.” Co jak wiadomo i z czym w pełni Recenzent się zgadza, stanowi bardzo duże uproszczenie, a także „... może prowadzić do wyników oddających zachowanie struktury biologicznej bardzo dalekie od rzeczywistego.” Dla zaproponowanego własnego podejścia dokonał szeregu analiz na modelu kości gąbczastej, a otrzymane wyniki poddał weryfikacji. Analizie poddał także sposób modelowania połączenia części gąbczastej z częścią korową kości. Wyniki swoich analiz numerycznych oparł na ocenie stanu odkształcenia i naprężenia biorąc za miarę średnie wartości odkształcenia i naprężenia zredukowanego.

Uwagi. W opinii Recenzenta, Doktorant przeprowadził i przedstawił bardzo wnikliwe badania i analizy, z których wyciągnął szereg interesujących wniosków. Swoje własne wyniki porównywał z modelem referencyjnym, w którym założono jednorodną dystrybucję parametrów fizycznych i mechanicznych. Studiując omawiany rozdział, nasuwają się jednak następujące wątpliwości oraz pytania wymagające wyjaśnienia:

- 1) Autor w części opisu teoretycznego modelu konstytutywnego kości przedstawia opis odnoszący się do opisu ortotropowego właściwości mechanicznych. Jednakże dalej w swoich analizach numerycznych dokonuje homogenizacji właściwości mechanicznych i używa w ramach pojedynczego elementu dyskretnego opisu izotropowego.
- 2) Analizę swojej metody rozkładu niejednorodności mechanicznych zależnych od parametru fizycznego, jakim jest gęstość materiału kości, przeprowadza na modelu wycinka kości zbudowanej na bazie regularnej siatki bryłowych elementów ośmiowęzłowych. Jakimi kryteriami kierowano się budując ten model? Czy wielkość elementów skończonych była funkcją wymiaru pojedynczego woksła? Dlaczego w późniejszych analizach Autor używa do opisu całych kości najprostszych elementów czworobocznych powstałych na bazie siatki elementów trójkątnych, które jak wiadomo posiadają inne funkcje kształtu i inny rozkład punktów całkowania niż elementy sześcioboczne powstałe na bazie elementów czworokątnych?
- 3) Jak wyglądał rozkład niejednorodności materiałowych w badanym wycinku względem poszczególnych osi układu współrzędnych?
- 4) Recenzent sugeruje by zamiast używania haseł związanych z danym systemem komputerowym np. w tym przypadku „glue”, dokonać pełnego opisu danych opcji zarówno od strony fizycznej, jak też i matematycznej.
- 5) Analizując ten rozdział Recenzent zauważa, że Doktorant nie przedstawił, jaki rodzaj analiz numerycznych był przez niego prowadzony i jakie zostały przyjęte kryteria zbieżności w przypadku, gdyby były to np. analizy iteracyjne. Jak

wiadomo sama analiza zagadnienia kontaktu wymaga zastosowania tego typu metod.

- 6) Recenzent zachęca, by dla lepszego uwiarygodnienia zaproponowanej metody, w kolejnych badaniach przeprowadzić serię testów ściskania na wybranych wycinkach kości na drodze badań eksperymentalnych.

Rozdział 6. Analiza stawu biodrowego przed i po operacji alloplastyki (37 stron)

W pierwszej kolejności Doktorant dokonał odpowiedniego doboru warunków początkowo-brzegowych uwzględniając m.in. tarcie pomiędzy współpracującymi strukturami oraz dokonał weryfikacji modelu dla stanu przedoperacyjnego w stosunku do wyników badań spotykanych w literaturze. Należy wspomnieć, że obiektem badań jest w tym rozdziale staw biodrowy zarówno w stanie przedoperacyjnym, jak też po zabiegu endoprotezoplastyki oraz kapoplastyki. Otrzymane wyniki zostały zweryfikowane przez Autora na bazie wyników dostępnych w literaturze. Recenzent pragnie podkreślić ogromny wysiłek, jaki Doktorant wykonał przeprowadzając całościowe analizy dla obszaru kości udowej, szyjki kości udowej oraz obszaru trzonu oraz krętarza. Przeprowadzone analizy komputerowe i otrzymane na ich bazie wyniki przedstawił w aspekcie zmiany sztywności badanego układu oraz porównań stanów odkształcenia i naprężenia we wspomnianych poszczególnych obszarach.

Uwagi. Do małych mankamentów tego rozdziału należy zaliczyć:

- 1) Autor przedstawia dane statystyczne badanych modeli i czas uzyskania wyników, jednak nie precyzuje sposobu prowadzonych analiz numerycznych i przyjętych kryteriów zbieżności ?
- 2) Doktorant mówiąc o sztywności w wielu przypadkach mówi tylko o module Younga, natomiast sztywność to wielkość zależna także od wymiarów geometrycznych.
- 3) W opisie tab. 6.3, zamiast „prędkość odkształcenia” Recenzent sugeruje używać szybkość odkształceń (ang. strain rate), który to parametr bardziej oddaje poprawność opisu zachowania się materii w funkcji czasu, szczególnie ma to znaczenie przy deformacjach zachodzących przy oddziaływaniach impulsowych.

Rozdział 7. Podsumowanie rozprawy (2 strony)

Rozdział stanowi podsumowanie wyników prowadzonych badań w zakresie zaproponowanego opisu niejednorodności materiału kości i następnie przeniesienia tego sposobu modelowania na wymiar praktyczny, tj. modelowania wycinka układu stawu biodrowego. Wyciągnięte przez Doktoranta wnioski są jak najbardziej właściwe.

4. Pytania szczegółowe

Recenzent prosi Doktoranta o ustosunkowanie się do następujących kwestii:

- 1) Jak zachowuje się materiał kości w przypadku oddziaływań o charakterze dynamicznym ? Jakże obowiązują tutaj relacje ?
- 2) Na ile celowym jest uwzględnienie w przedstawionych badaniach analiz zmęczeniowych ? Jakimi innymi przesłankami lub ważnymi argumentami należy się kierować podejmując próbę modelowania elementów kostnych w aspekcie zmiany wieku lub też wpływu np. rodzaju krwi lub DNA ?

Przedstawione powyżej zagadnienia stanowią tzw. głos w dyskusji i mogą być podstawą do dalszego prowadzenia badań przez Doktoranta w tym kierunku i jego dalszego rozwoju naukowego.

5. Ocena ogólna pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wnosi duży wkład i nową jakość do modelowania numerycznego układów kostnych i stanowi bardzo silne wsparcie działań medycznych. Doktorant przy wykonaniu tej pracy wykazał się wysoką wiedzą zarówno od strony analiz numerycznych, modelowania CAD, przetwarzania i obróbki obrazu, jak też z zakresu anatomii i biomechaniki. Recenzowana rozprawa stanowi obszerne studium zaawansowanych analiz numerycznych.

W opinii Recenzenta, na bardzo dobrą wartość naukową rozprawy składają się szczególnie następujące elementy:

- 1) zaprezentowana metoda budowy modeli numerycznych układów biologicznych (ze szczególnym uwzględnieniem stawu biodrowego człowieka),
- 2) zaproponowana metoda modelowania wartości i dystrybucji parametrów materiałowych z uwzględnieniem udziału objętościowego poszczególnych grup materiałowych, która pozwala uzyskać niejednorodną dystrybucję z założoną przez badacza średnią wartością modułu Younga E w obrębie danej struktury,
- 3) metoda objętościowego modelowania niejednorodnej dystrybucji parametrów materiałowych, która pozwala badać kondycję kości (także stanów patologicznych), jak również znajduje zastosowanie w badaniu dowolnych segmentów kości oraz umożliwia definicję wartości i rozkładu parametru materiałowych w obrębie połączeń różnych struktur.

Recenzent w przedstawionej do oceny pracy znalazł drobne błędy edycyjne, które jednak nie wpływają na całościową ocenę merytoryczną. Należy podkreślić, że Doktorant wykonał pracę doktorską na wysokim poziomie z widocznym bardzo dużym nakładem pracy potwierdzonym bardzo licznymi analizami oraz z wykorzystaniem aktualnych oraz dostępnych metod i technik badawczych.

6. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku) i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgra inż. MATEUSZA DUDY.



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "M. Duda".