

dr hab. inż. Aneta Gądek-Moszczak, prof. PK
Katedra Informatyki Stosowanej
Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

Kraków, 21.07.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriana Łukasza Wita

*Analiza stanu obciążenia kości udowej człowieka w cyklu normalnego chodu
z wykorzystaniem metody elementów skończonych*

Promotorzy rozprawy: dr hab. inż. Sebastian Wroński, prof. uczelni
prof. dr hab. inż. Paweł Lipiński

1. Formalna podstawa wykonania recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie pisma wystosowanego przez prof. dr hab. Janusza Wolnego przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 06.06.2023 r. informującego o powołaniu na recenzenta w.w rozprawy, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne.

2. Tematyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska poświęcona jest analizie stanu obciążenia kości udowej człowieka w cyklu normalnego chodu z wykorzystaniem metod elementów skończonych. Podjęty temat pracy jest niezwykle interesującym i złożonym zagadnieniem interdyscyplinarnym, łączącym zagadnienia z obszaru mechaniki a w szczególności biomechaniki oraz modelowania z wykorzystaniem metod elementów skończonych.

Doktorant w swojej pracy dokonał analizy porównawczej trzech modeli biomechanicznych analizy stanu obciążenia kości udowej człowieka w cyklu normalnego chodu. Pierwszy z nich stanowi implementację modelu bryłowego opracowanego w ramach projektu *Gait2392* w programie *OpenSim*. Drugi model, belkowy Doktorant opracował na podstawie *Gait2392* metodami elementów skończonych. Natomiast trzeci jest modyfikacją modelu belkowego, gdyż zaimplementowany został model objętościowy kości udowej, stworzony na podstawie obrazu rzeczywistej kości udowej uzyskanego z mikrotomografii komputerowej. Elementem szczególnie interesującym w tym modelu i stanowiącym istotny element nowości jest

przeprowadzenie obliczeń anizotropowego modelu konstytutywnego na podstawie obliczeń morfometrycznych kości, a następnie przypisanie ich do elementów siatki.

Zaprezentowane modele obciążeń i odkształceń kości udowej zostały bardzo szczegółowo opisane, a wyniki symulacji oraz uzyskanych wartości obciążeń i odkształceń kości udowej dla poszczególnych faz chodu poddano krytycznej analizie i dyskusji, w której Doktorant w sposób przekonujący przedstawiał zalety poszczególnych modeli oraz ich ograniczenia.

3. Ogólna charakterystyka i ocena formalna

Przedstawiona do oceny praca doktorska Pana mgr inż. Adriana Łukasza Wita powstała pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Sebastiana Wrońskiego i prof. dr hab. inż. Pawła Lipskiego. Tytuł rozprawy „*Analiza stanu obciążenia kości udowej człowieka w cyklu normalnego chodu z wykorzystaniem metody elementów skończonych*” został sformułowany poprawnie i odpowiada treści przedstawionej w pracy.

Praca liczy łącznie 177 stron i składa się z wprowadzania, pięciu numerowanych rozdziałów oraz podsumowania. W pracy dołączono bibliografię – 183 pozycje oraz spis rysunków – 122 ilustracje. Przedstawiony wykaz osiągnięć naukowych obejmujący: publikacje tematyczne, których autorem lub współautorem jest doktorant; rozdział w monografii, którego jednym z autorów jest doktorant; wykaz wystąpień konferencyjnych krajowych i zagranicznych oraz wykaz odbytych przez doktoranta staży i pobytów naukowych, pozwala na stwierdzenie, iż Doktorant w trakcie realizacji pracy doktorskiej poddawał ocenie częściowe efekty swojej pracy przed gremium międzynarodowych ekspertów oraz doskonalił umiejętność prowadzenia dyskursu naukowego.

We **wprowadzeniu** Doktorant przedstawił motywację podjęcia tematu oraz zdefiniował główny cel pracy, którym jest **analiza stanów naprężeń i odkształceń kości udowej człowieka pod wpływem fizjologicznego obciążenia na przykładzie chodu**.

Rozdział 1 pracy został poświęcony wprowadzeniu do anatomicznych i fizjologicznych aspektów układu mięśniowo-szkieletowego człowieka oraz podstawowych zagadnień z zakresu biomechaniki ruchu, niezbędnych z punktu widzenia podjętej w pracy problematyki. Przedstawione zostały modele reologiczne mięśnia, charakterystyka ścięgna, własności sprężyste kompleksu mięsno-ścięgnistego oraz model lepko-sprężysty mięśnia. W podrozdziale 1.3, poświęconym układowi kostnemu, Doktorant zawarł analizę właściwości tkanki kostnej z uwzględnieniem części zbitnej oraz części gąbczastej, charakterystykę właściwości struktury beleczkowej, sprężyste równanie konstytutywne oraz aproksymację tensora sprężystości modelem *Zyssera-Curniera*. Analiza budowy kości udowej została

przeprowadzona zarówno w skali makroskopowej jak i mikroskopowej z uwzględnieniem wpływu lokalnego stanu naprężenia na mikroarchitekturę wewnętrzną.

W **rozdziale drugim** Doktorant szczegółowo przedstawił model numeryczny układu mięśnioszkieletowego *Gait2392* wykorzystany do przeprowadzenia analizy obciążeń i odkształceń kości udowej w kolejnych fazach chodu w programie *OpenSim*. Szczegółowo opisano i przeanalizowano każdy z zaimplementowanych modeli poszczególnych elementów rozważanego łańcucha kinematycznego, jak również przedstawiono procedurę obliczeń kinematycznych i dynamicznych w programie *OpenSim*. Model *Gait2392* stanowi model referencyjny w stosunku do dwóch pozostałych opracowanych przez Doktoranta.

Rozdział trzeci prezentuje kolejne etapy tworzenia modelu belkowego kończyny dolnej, który został zamodelowany przez Doktoranta metodami elementów skończonych. Doktorant poświęca uwagę każdemu z elementów układu kostno-szkieletowego i analizując ich właściwości oraz funkcję w cyklu chodu dobiera odpowiednie modele matematyczne, które umożliwią prawidłowe odtworzenie ruchu kończyny podczas chodu. Dobór wykorzystanych modeli jest wsparty dogłębną analizą literaturową oraz przekonywującą argumentacją. Do stworzenia modelu kości zostały wykorzystane elementy o profilu rurowym ze zmiennym przekrojem, nawiązującym do rzeczywistej geometrii kości, a układ mięśniowy został odwzorowany z wykorzystaniem dwuwęzłowych trójwymiarowych prętów. W celu wykonania symulacji ruchu kończyny przyjęto sprężysto-kurczliwy model mięśnia, co umożliwiło Doktorantowi sterowanie wydłużeniem i siłą mięśnia. Przyczepy mięśniowe zamodelowano wykorzystując połączenia typu *kinematic coupling*, które ma na celu wyłącznie powiązanie i przeniesienia siły mięśnia na kość w celu wywołania obrotu w stawie. Modelowanie stawów w stosunku do modelu *Gait2392* zostało uproszczone, przy zachowaniu ich zakresów ruchomości. Poza siłami oddziaływania mięśni na kość w tworzonym modelu kończyny uwzględniono również siły zewnętrzne, wynikające z oddziaływania ruchu miednicy na kończyny w trakcie chodu, wpływ pola grawitacji, siły reakcję podłoża. Przeprowadzono walidację modelu kurczliwego mięśnia oraz dokonano analizy wyników przesztywnionego modelu belkowego a następnie przeprowadzono optymalizację modelu MES poprawiając jego dokładność.

Rozdział czwarty szczegółowo opisuje wszystkie etapy tworzenia modelu objętościowego kości udowej, który bazuje na rzeczywistej geometrii oraz mikroarchitekturze kości zobrazowanej przy użyciu mikrotomografii komputerowej. Na podstawie uzyskanego obrazu binarnego struktury kości (zbitej i gąbczastej) utworzono model objętościowy w MES i dopasowano go do modelu belkowego. W tym celu zamodelowano trójwymiarowy model

panewki stawu biodrowego uwzględniający zarówno tkankę chrzęstną i kostną, chrząstki stawu kolanowego oraz grupy elementów odwzorowujących anatomiczne obszary przyczepu mięśni. Implementacja modelu konstytutywnego dla modelu rzeczywistej kości uwzględniała analizę cech morfometrycznych badanej kości oraz ocenę ich zmienności w zależności w badanej objętości. Wybrano standardowe parametry opisujące strukturę beleczkową kości, takie jak: względny udział objętościowy, średnią grubość beleczek oraz średnią wielkość porów, czyli przestrzeni międzybeleczkowej oraz anizotropię. Następnie przypisano parametry morfometryczne elementom siatki MES, co pozwoliło na przyporządkowanie każdemu elementowi właściwości materiałowych odpowiadających rzeczywistej strukturze kostnej. Dokonano analizy rozkładu parametrów morfometrycznych dla całej kości, a także analizy orientacji maksymalnego kierunku głównego tensora struktury H, oraz rozkładu modułu Younga.

W rozdziale piątym doktorant zaprezentował i poddał analizie wyniki stanu obciążenia modelu kości udowej w całym cyklu chodu oraz przeprowadził analizę porównawczą z wynikami analizy w modelu *OpenSim* oraz belkowym. Doktorant wykazał, iż model objętościowy charakteryzuje się większą zgodnością z modelem *OpenSim* niż model belkowy. Model objętościowy pozwala na dokładną analizę zjawisk zachodzących w kości udowej i na jej powierzchni, co stanowi z pewnością element nowości w obszarze badań nad zmianą stanu obciążenia kości w cyklu chodu. Przeprowadzone analizy umożliwiły zwizualizowanie i analizę rozkładu ciśnienia kontaktowego na panewce kości udowej, rozkładu naprężeń oraz głównego odkształcenia na powierzchni kości udowej w wybranych fazach cyklu chodu. Szczególną uwagę Doktorant poświęcił na analizę stanu naprężeń i odkształceń nasady bliższej kości udowej, co jest uzasadnione specyficzną, skomplikowaną mikroarchitekturą beleczkową, złożonym stanem naprężeń oraz podatnością tego obszaru kości na złamania. Zaprezentowane wyniki pozwoliły na przeprowadzenie dokładnej analizy zmiany rozkładu naprężenia, kierunków głównych naprężeń oraz głównych odkształceń w obszarze nasady bliższej w wybranych fazach chodu oraz ich korelacji z orientacją beleczek kostnych. Doktorant dokonał analizy gęstości energii odkształcenia sprężystego i wykazał, iż w trakcie chodu obszar analizowanej głowy kości udowej znajduje się w stanie równowagi, co oznacza, że nie zachodzi zmiana gęstości.

Rozdział piąty Doktorant kończy określeniem perspektyw rozwoju opracowanego modelu objętościowego oraz możliwych obszarów jego zastosowania.

Prezentacja poszczególnych etapów pracy jest logiczna i zrozumiała, chociaż dość niekonwencjonalna. Doktorant zrezygnował z tradycyjnej kompozycji, która składa się

z wprowadzenia, opisu problemu badawczego, prezentacji aktualnego stanu zagadnienia, będącego krytyczną analizą doniesień literaturowych, opisu metody, opisu eksperymentu i dyskusji wyników, podsumowania i wniosków. W dysertacji brak formalnie sformułowanych wniosków, chociaż w rozdziale Podsumowanie można znaleźć sformułowania, które *de facto* są wnioskami z przeprowadzonych eksperymentów.

4. Ocena merytoryczna i uwagi krytyczne

Podjęty temat pracy jest niezwykle interesującym i złożonym zagadnieniem interdyscyplinarnym, łączącym zagadnienia z obszaru mechaniki a w szczególności biomechaniki oraz modelowania z wykorzystaniem metod elementów skończonych.

Wybór wykorzystanych modeli na każdym z etapów projektowania został w sposób przekonujący uargumentowany i poprzedzony krytyczną analizą, co potwierdza szeroką wiedzę Doktoranta w obszarze biomechaniki i modelowania MES. Wnikliwa analiza uzyskanych wyników pozwoliła Doktorantowi na zidentyfikowanie ciekawych relacji pomiędzy występującymi naprężeniami i odkształceniami a strukturą geometryczną kości. Połączenie rzeczywistej struktury geometrycznej kości z modelem MES pozwoliło na wnikliwą analizę zmian naprężeń na powierzchni kości udowej w trakcie chodu a w szczególności zmian rozkładu naprężeń nasady bliższej kości udowej, która jest szczególnie narażona na złamanie. Opracowana metodyka budowy modelu biomechanicznego kończyny dolnej z określeniem anizotropowego modelu konstytutywnego kości udowej może być wykorzystywana do tworzenia i badania innych modeli biomechanicznych, co przyczyni się do poszerzenia wiedzy na temat działania układu ruchu człowieka. Praca oprócz dużej wartości poznawczej ma również wartość użyteczną, gdyż wykorzystując opracowany model będzie możliwe badanie wpływu zmian parametrów morfometrycznych kości na ich wytrzymałość, co ma znaczenie w przypadku schorzeń takich jak nowotwór kości czy osteoporoza. Opracowany model może również zostać wykorzystany do projektowania i testowania spersonalizowanych implantów kości lub protez kończyny dolnej.

Za oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny Nauki Fizyczne zaliczam:

- opracowanie metodyki budowy modelu biomechanicznego kończyny dolnej z określeniem anizotropowego modelu konstytutywnego kości udowej,
- wyniki symulacji stanu obciążeń kości w cyklu chodu.

Uwagi krytyczne i błędy edytorskie

Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Łukasza Wita zawiera dość liczne błędy literowe (ponad 40) oraz pewne nieścisłości. Oczekuję ze strony Doktoranta udzielenia wyjaśnień odnośnie następujących uwag:

1. We wprowadzeniu Doktorant sformułował główny cel pracy. W następnym akapicie znajduje się sformułowanie: „Każdy z rozdziałów zawiera określone cele prowadzące do realizacji głównego celu”. Jednak w przypadku pierwszego rozdziału z pewnością nie jest to prawda, gdyż poświęcony jest anatomii i fizjologii układu mięśnieo-szkieletowego kończyny dolnej. Analizując treść kolejnych rozdziałów nie znajduję jednoznacznie sformułowanych celów. Nie oznacza to, że badania nie łączą się w logiczny proces badawczy, lecz w moim przekonaniu, gdyby Doktorant sformułował cele pośrednie we wprowadzeniu zaraz po określeniu celu głównego oraz przytoczył je na początku każdego z rozdziałów, praca byłaby bardziej czytelna. Czy Doktorant mógłby zdefiniować w sposób jednoznaczny cele pośrednie rozprawy doktorskiej?
2. W rozdziale 3.3 str. 85 Doktorant wprowadza termin „chwile czasowe” uzyskanej symulacji ruchu prawej kończyny. Termin ten pojawia się wielokrotnie na kolejnych stronach rozprawy. W moim przekonaniu jest to bardzo niefortunne, błędne językowo i nieprecyzyjne sformułowanie. Czy mógłby Doktorant zaproponować termin, który w bardziej jednoznaczny sposób określa przedmiot analizy?
3. Rozdział 4.1.1. str. 106, drugi akapit. Doktorant opisuje procedurę przetwarzania trójwymiarowego obrazu binarnego, w wyniku której uzyskana zostaje powierzchnia kości. Obliczając różnicę dwóch obrazów trójwymiarowych, których podstawowym elementem jest woksel, Doktorant pisze, że otrzymuje powierzchnię o grubości 2 pikseli. Piksele są podstawowym elementem obrazów dwuwymiarowych. Czy Doktorant uzyskał w obrazie trójwymiarowym powierzchnię tworzoną przez piksele?
4. Rozdział 4.2.2. W modelu panewki stawu biodrowego dla poszczególnych struktur: chrzęstnej i kostnej Doktorant przypisał izotropowe właściwości materiałowe. Na jakiej podstawie przypisano te konkretne wartości modułu Younga i współczynnika Poissona? Nie znalazłam odniesienia literaturowego ani opisu, który wyjaśniłby tę wątpliwość.
5. Rozdział 4.3. Przy wstępnej analizie morfometrycznej kości udowej Doktorant wybrał dziewięć obszarów znajdujących się wewnątrz kości udowej. Jakie było kryterium wyboru obszarów analizy morfometrycznej? Osiem z nich znajduje się w obszarze struktury beleczkowej, natomiast jeden (nr 7) obejmuje oba obszary: struktury beleczkowej i zbitej. Jeśli przedmiotem analizy jest cała kość, to obszary analizy powinny jednoznacznie

reprezentować obie struktury. Jeśli w z powodu rozdzielczości obrazu porowatość części zbitej nie jest odwzorowana, to możemy chyba ją pominąć. W takim razie jaką informację ma dostarczyć obszar reprezentujący obie struktury?

6. Parametr morfometryczny BV/TV określany przez Doktoranta jako frakcja objętości jest zaczerpnięty bezpośrednio z oprogramowania, które zostało wykorzystane do analizy struktury beleczkowej. Szkoda, że Doktorant nie zastosował terminologii stereologicznej, która jest znacznie bardziej ugruntowana i wykorzystywana w ilościowej analizie obrazów od ponad pół wieku. BV/TV to nic innego jak V_v – czyli objętość względna lub udział objętościowy.

5. Konkluzja

Tematyka ocenianej pracy mieści się w zakresie dyscypliny Nauki Fizyczne. Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Łukasza Wita obejmuje ważne zagadnienia zarówno w aspekcie teoretycznym jak i praktycznym. W trakcie jej realizacji doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością metod badawczych i analitycznych. Konkludując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **mgr inż. Adriana Łukasza Wita** spełnia warunki określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595 z późn. zmianami) i **wniosuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne o dopuszczenie mgr inż. Adriana Łukasza Wita do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**



Dr hab. inż. Aneta Gądek-Moszczak, prof. PK