

Gliwice, 27.10.2023r.

prof. dr hab. inż. Robert Michnik  
Katedra Biomechatroniki  
Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Biomedycznej  
ul. Roosevelta 40  
41-800 Zabrze  
e-mail: Robert.Michnik@polsl.pl

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Piotra Krężałka

*pt.: „Metody optymalizacji statycznej w ocenie zaangażowania mięśni podczas chodu”*

### 1 Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo o sygnaturze NN/RN.510-114/23 Przewodniczącego Rady Naukowej Akademii Wychowania Fizycznego w Krakowie, prof. dr hab. Anny Marchewka z dnia 12 lipca 2023 r., w którym zostałem poinformowany o powołaniu mojej osoby przez Radę Naukową Akademii Wychowania Fizycznego w Krakowie na recenzenta pracy doktorskiej mgr Piotra Krężałka.

### 2 Przedmiot i zawartość rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt.: „Metody optymalizacji statycznej w ocenie zaangażowania mięśni podczas chodu” autorstwa Pana mgr Piotra Krężałka. Praca ma charakter teoretyczno-badawczy i składa się z 7 rozdziałów głównych. Całość pracy liczy 133 strony, 4 rysunki, 6 tabel. Do napisania pracy wykorzystano 93 pozycje literaturowe związane ściśle z tematyką prowadzonych przez autora badań. Rozprawa uzupełniona została 3 załącznikami zawierającymi: spis tabel, spis rysunków oraz zestawienie wybranych wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych. Układ pracy jest typowy dla prac naukowych, z wyraźnym podziałem na ocenę aktualnego stanu wiedzy (rozdział *Wstęp*), sformułowanie celu badań i postawienie hipotez badawczych (rozdział *Cel pracy*), prezentację wyników badań (rozdział *Wyniki*), dyskusję wyników oraz przedstawienie wniosków końcowych (odpowiednio rozdziały *Diskusja* oraz *Wnioski*).

Tematyka rozprawy doktorskiej koncentruje się w badaniach wrażliwości modeli matematycznych stosowanych w identyfikacji aktywności mięśni i obciążeń układu mięśniowo-szkieletowego oraz poszukiwaniu modyfikacji tego typu modelu gwarantujących uzyskanie wyników symulacji zbieżnych z wynikami badań eksperymentalnych. Cennym aspektem rozprawy jest pokazanie praktycznych możliwości wykorzystania wyników symulacji funkcjonowania narządu ruchu, a w szczególności identyfikacji aktywności mięśni, do wspomagania diagnostyki dysfunkcji narządu ruchu. Tak postawione cele badawcze recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr Piotra Krężałka wpisują się w tematykę aktualnie prowadzonych badań biomechanicznych.

### **3 Ocena merytoryczna pracy**

Tematyka badań prezentowanych w rozprawie doktorskiej koncentruje się na rozwijaniu metod pozwalających na ocenę funkcjonowania układu mięśniowego z wykorzystaniem modelowania matematycznego i symulacji numerycznych. Tego typu metody umożliwiają wyznaczenie obciążeń układu szkieletowo-mięśniowego, w szczególności sił mięśniowych i reakcji w stawach, jak również określenie aktywności poszczególnych mięśni. Tym samym możliwa jest kompleksowa ocena funkcjonowania narządu ruchu, z wykorzystaniem danych kinematycznych, obciążeń zewnętrznych, ale również sił mięśniowych, aktywności mięśni i reakcji w stawach.

Praca została podzielona na trzy główne części stanowiące odpowiednio: wprowadzenie do prowadzonych badań, opis badań własnych oraz podsumowanie końcowe. Pierwszy rozdział pracy *Wstęp* przedstawia aktualny stan wiedzy związany z tematyką pracy – modelowaniem układu mięśniowo-szkieletowego oraz możliwości praktycznych wykorzystania tego typu badań. Rozdział ten kończy się trafnym podsumowaniem przeprowadzonych badań literaturowych z precyzyjnym uzasadnieniem przesłanek będących podstawą podjęcia tematu badawczego (rozdział *Uzasadnienie podjętego tematu*). Druga część pracy, w której doktorant przedstawił wyniki własnych badań rozpoczyna się rozdziałem *Cel pracy*, w którym przedstawiono cele pracy oraz postawione hipotezy badawcze i pytania badawcze. Doktorant za zasadniczy cel pracy przyjął „opracowanie metody pozwalającej na zastosowanie zaawansowanego matematycznie kryterium minimum zmęczenia dla układów złożonych z wielu mięśni”. Moim zdaniem tak sformułowany cel pracy jest zbyt ogólny i nie do końca prezentuje w pełni zawartość rozprawy. Zdecydowanie lepiej tematykę zrealizowanych w ramach doktoratu badań odzwierciedlają trzy kolejne cele pracy:

- stworzenie procedur pozwalających na oszacowanie udziałów mięśniowych także dla innych kryteriów oraz określenie kryterium odpowiadającego temu, jakie zostało wybrane przez układ sterowania ruchem w rozwiązaniu zagadnienia współdziałania mięśni podczas chodu,



- dokonanie wstępnej weryfikacji opracowanych procedur na przykładach chodu fizjologicznego i patologicznego,
- stworzenie możliwości poszerzenia protokołów analizy chodu o dodatkowe informacje o zaangażowaniu poszczególnych mięśni w realizację ruchu.

Ostatni cel pracy uważam za cenny z uwagi na jego możliwości aplikacyjnego wykorzystania do wspomagania diagnostyki narządu ruchu. Rozszerzeniem i uszczegółowieniem celu pracy są pytania-oraz hipotezy badawcze. Autor pracy przedstawił trzy pytania badawcze:

1. Czy możliwe jest opracowanie procedury umożliwiającej zastosowanie, dającego dobrą zgodność z pomiarami bezpośrednimi, kryterium minimum zmęczenia (minimum fatigue) dla modelu złożonego z wielu mięśni zaangażowanych podczas chodu?
2. Czy możliwe jest opracowanie procedury, która w oparciu o dostępne wyniki badań, w postaci wybranych wielkości kinematycznych i wypadkowych momentów sił oraz sygnałów EMG mięśni, pozwoli na określenie kryterium optymalizacyjnego, zgodnego z tym, jakim kierował się układ sterowania ruchem w czasie chodu?
3. Czy w przypadkach, gdy informacje zawarte w standardowych protokołach analizy chodu nie są wystarczające do podejmowania jednoznacznych decyzji klinicznych, poszerzenie tych protokołów o informacje o zaangażowaniu poszczególnych mięśni, wzbogacą zasób informacji ułatwiających sformułowanie diagnozy?

Przedstawione pytania badawcze były podstawą do sformułowania hipotez badawczych:

1. Wykorzystanie zaawansowanych metod optymalizacji i specjalistycznego oprogramowania obliczeniowego, umożliwi opracowanie procedury pozwalającej zastosować kryterium minimum zmęczenia (minimum fatigue), w rozwiązaniu zagadnienia współdziałania mięśni w chodzie, dla modelu złożonego z wielu mięśni.
2. Dzięki stworzeniu procedury umożliwiającej rozwiązanie zagadnienia współdziałania mięśni dla różnych kryteriów na drodze optymalizacji statycznej oraz porównanie uzyskanych wartości pobudzeń mięśniowych z zapisem sygnału EMG dla wybranych mięśni, możliwe jest określenie, które z zastosowanych kryteriów jest zgodne z tym, którym kierował się układ sterowania ruchem w czasie chodu.
3. Wzbogacenie spektrum informacji dostępnych w standardowych protokołach analizy chodu o uzyskane na drodze optymalizacji statycznej informacje związane z zaangażowaniem poszczególnych mięśni, ułatwi stawianie diagnozy w przypadkach chodu patologicznego.

Do realizacji sformułowanych celów rozprawy doktorskiej, weryfikacji postawionych hipotez badawczych oraz odpowiedzi na postawione pytania badawcze, doktorant opracował

oryginalną metodykę badań. Jej pierwszym elementem jest opracowanie autorskiego modelu matematycznego układu mięśniowo-szkieletowego, który został wykorzystany do identyfikacji aktywności sił mięśniowych podczas chodu. Opracowane algorytmy zostały wykorzystane przez autora pracy do przeprowadzenia wielowariantowych symulacji funkcjonowania układu mięśniowego podczas chodu prawidłowego i patologicznego. Protokół badań numerycznych obejmował przeprowadzenie symulacji numerycznych z zastosowaniem różnych postaci kryterium sterowania ruchem (funkcji celu w zadaniu optymalizacyjnym). Uzyskany w ten sposób obszerny zestaw wyników symulacji był podstawą przeprowadzenia analizy wrażliwości wyników badań na różne postaci funkcji celu, którą przeprowadzono badając zgodność wyznaczonych przebiegów aktywności wybranych mięśni z wynikami badań elektromiograficznych. W rozprawie doktorant przedstawił również nową metodę oceny funkcji lokomocyjnych na podstawie opisu współdziałania agonistów i antagonistów. Wyniki przeprowadzonych badań (rozdział *Wyniki*) przedstawiono w postaci licznych wykresów, z obszernym opisem i ich analizą. W rozdziale *Dyskusja*, autor pracy przeprowadził staranną, obszerną analizę i dyskusję otrzymanych wyników badań, z licznymi odniesieniami do wyników innych autorów. Przeprowadzona dyskusja pozwoliła autorowi na sformułowanie trafnych wniosków końcowych (rozdział *Wnioski*), które odnoszą się zarówno do zakładanego celu pracy oraz postawionych hipotez badawczych.

#### **4 Najważniejsze osiągnięcia pracy**

Do najważniejszych, oryginalnych osiągnięć badawczych przedstawionej pracy doktorskiej należy zaliczyć:

1. Opracowanie modelu matematycznego kończyn dolnych człowieka umożliwiających identyfikację obciążeń układu mięśniowo-szkieletowego z wykorzystaniem formalizmu metody dynamiki wieloczłonowych oraz metod optymalizacji.
2. Opracowanie algorytmów numerycznych pozwalających na identyfikację obciążeń układu mięśniowo-szkieletowego z wykorzystaniem kryterium minimum zmęczenia mięśni.
3. Przeprowadzenie wielowariantowych symulacji komputerowych obciążeń układu szkieletowo-mięśniowego (z wykorzystaniem własnych algorytmów) dla różnych wariantów kryterium sterowania ruchem.
4. Opracowanie metody pozwalającej na ocenę zgodności przebiegów aktywności mięśni, wyznaczanych metodą doświadczalną i modelową, poprzez wprowadzenie wskaźnika podobieństwa (zgodności przebiegów), uwzględniającego współczynnik korelacji Pearsona, wskaźnik zgodności okresów aktywności, wskaźnik zależny od średniej kwadratowej różnic, wskaźnik zgodności monotoniczności.



5. Przeprowadzenie oceny wpływu na wyniki symulacji numerycznych różnych postaci funkcji celu w zadaniu optymalizacyjnym wykorzystywanym do identyfikacji sił mięśniowych oraz aktywności mięśni.
6. Opracowanie procedury numerycznej wyboru kryterium optymalizacyjnego w procesie identyfikacji obciążeń układu mięśniowo-szkieletowego.
7. Opracowanie metody analizy wyników badań funkcji lokomocyjnych, poszerzonej o analizę aktywności mięśni identyfikowanych na podstawie symulacji numerycznych.

## 5 Uwagi krytyczne i dyskusja materiału naukowego

Recenzowaną pracę oceniam pozytywnie, zarówno pod względem merytorycznym jak i edycyjnym. W kilku miejscach pracy pojawiły się drobne usterki edycyjne, nieścisłości lub nieprecyzyjne sformułowania. Uwagi szczegółowe zamieszczam poniżej.

1. Argumentem podjęcia tematyki badań są czasami obserwowane rozbieżności w przebiegach aktywności mięśni wyznaczanych na podstawie badań doświadczalnych (metodą elektromiograficzną) oraz wyników symulacji numerycznych. Przyczyną takiego stanu rzeczy nie jest tylko „brak dobrze identyfikującej metody kryterium sterowania ruchem”, ale również (o ile nie przede wszystkim) nieprawidłowych danych wprowadzonych do modelu, zwłaszcza danych dotyczących modelu sił generowanych przez mięśnie. W większości tego typu modeli parametry opisujące poszczególne mięśnie są wartościami uśrednionymi i co za tym idzie mogą odbiegać od parametrów układu mięśniowego badanej osoby. W wielu publikacjach naukowych udowodniono, że wyniki symulacji numerycznych funkcjonowania układu mięśniowo-szkieletowego są wrażliwe na wprowadzane do modelu parametry układu mięśniowego.
2. Jako główny cel pracy doktorant wskazał „opracowanie metody pozwalającej na zastosowanie zaawansowanego matematycznie kryterium minimum zmęczenia dla układów złożonych z wielu mięśni”. Według mnie tak sformułowany cel pracy jest zbyt ogólny i nie najlepiej odzwierciedla zawartość rozprawy. Zrealizowane badania zdecydowanie lepiej opisują sformułowane hipotezy i pytania badawcze.
3. Doktorant przedstawił trzy hipotezy badawcze i trzy pytania badawcze. Uważam, że postawione hipotezy i pytania są bardzo ambitne. Każda z hipotez mogłoby być tematem osobnej rozprawy doktorskiej. Postawienie trzech tak wymagających hipotez i pytań w pracy, spowodowało, że do pracy wkradł się mały chaos. Np. prezentacja wyników badań zaczyna się od odpowiedzi na trzecie pytanie badawcze - przedstawienia możliwości diagnostycznych opracowanej procedury badawczej. Po obszernym przedstawieniu tych możliwości. Autor rozprawy wraca do prezentacji

wyników będących odpowiedzią na pierwsze i drugie pytanie badawcze, które związane są z opracowaniem i weryfikacją nowej metody oceny funkcjonowania narządu ruchu.

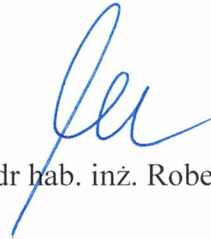
4. Symulacje numeryczne funkcjonowania układu mięśniowego obejmujące estymację aktywności poszczególnych mięśni oraz identyfikację sił mięśniowych, reakcji w stawach – wymagają wprowadzenia danych kinematycznych badanego ruchu oraz sił zewnętrznych działających na narząd ruchu podczas badanej aktywności. W rozdziale z opisem metodyki badań zabrakło informacji o tym, że opracowana metodyka badań wymaga wprowadzenia do modelu obliczeniowego danych z pomiarów doświadczalnych.
5. Przedstawiony model matematyczny układu mięśniowego zawiera szczegółowe i obszernie informacje dotyczące modelu sił generowanych przez poszczególne mięśnie z precyzyjnym opisem zależności na składową aktywną i bierną. Niestety w pracy nie podano danych dotyczących liczby mięśni uwzględnionych w modelu oraz wykazu mięśni uwzględnionych w modelu. Schematyczne przedstawienie opracowanego modelu w postaci rys. 3.6 jest niewystarczające.
6. Analizując wyniki badań zgodności sygnałów EMG i aktywności mięśni wyznaczone dla różnych wariantów funkcji celu, które przedstawiono w tabelach 4.3 i 4.4, warto zwrócić uwagę, że różnice pomiędzy wynikami dla różnych kryteriów sterowania ruchem nie są zbyt duże. Tak więc konkluzje przedstawione we wnioskach końcowych 4, 5, 6 są zbyt daleko idące.
7. Szkoda, że autor pracy nie zbadał jaki jest wpływ parametrów modelu układu mięśniowego na wyniki symulacji numerycznych – aktywności mięśni i sił generowanych przez mięśnie. Bazując na wynikach badań wrażliwości modelu układu mięśniowo-szkieletowego, dostępnych w literaturze, przypuszczam, że mogłoby się okazać, że przedstawiony w rozprawie model będzie bardziej wrażliwy na parametry poszczególnych mięśni uwzględnionych w modelu, niż na różne postacie funkcji celu. Tym samym lepsze dopasowanie do wyników badań doświadczalnych łatwiej byłoby osiągnąć dobierając odpowiednie parametry układu mięśniowego, a nie modyfikując kryterium ruchu.

## **6 Wnioski końcowe**

Recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr Piotra Krężałka, pt.: „Metody optymalizacji statycznej w ocenie zaangażowania mięśni podczas chodu” wpisuje się w obszar badań nauk o kulturze fizycznej. Badania przedstawione w pracy stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Autor rozprawy wykazał się dobrą znajomością komputerowych metod identyfikacji obciążeń układu szkieletowo-mięśniowego oraz umiejętnością interpretacji uzyskanych na drodze symulacji komputerowych danych

dotyczących funkcjonowania układu mięśniowego. Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 5 mają charakter porządkowy lub dyskusyjny i nie obniżają dobrego moim zdaniem poziomu naukowego recenzowanej rozprawy.

Biorąc pod uwagę powyższe aspekty stwierdzam, że opiniowana praca doktorska spełnia wymagane Ustawą warunki, to jest art.13 ust.1 *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr Piotra Kręzałka do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w szczególności do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



prof. dr hab. inż. Robert Michnik