

Prof. dr hab. inż. Celina Pezowicz
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska
ul. Łukasiewicz 7/9
50-371 Wrocław

Wrocław, 27.12.2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. ANDRZEJA MICHNIKA „*Modularny system sterowania robota rehabilitacyjnego narządów ruchu ze sprzężeniem siłowym*”
Promotor: prof. dr hab. Robert Michnik

Podstawa opracowywania recenzji: pismo z dnia 25 października 2024 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Roberta Michnika z prośbą o opracowanie recenzji.

1. ZAKRES ROZPRAWY

Postęp technologiczny w dziedzinie medycyny otwiera nowe możliwości w procesach rehabilitacji. Roboty i egzoszkielety stanowią innowacyjne narzędzia wspierające proces przywracania sprawności kończyn górnych u osób z różnorodnymi dysfunkcjami. Ich zastosowanie pozwala na bardziej precyzyjną i efektywną rehabilitację w porównaniu do tradycyjnych metod. Kończyny górne jako złożony narząd ruchu o wielu stopniach swobody, odgrywają kluczową rolę w codziennym funkcjonowaniu człowieka a ich dysfunkcje mogą znacząco wpływać na jakość życia, ograniczając zdolności do wykonywania podstawowych czynności.

Roboty rehabilitacyjne to zaawansowane urządzenia mechatroniczne, zaprojektowane w celu wspierania lub zastępowania ruchów wykonywanych przez pacjenta. Są wyposażone w systemy sensoryczne, które umożliwiają monitorowanie ruchu i dostosowanie poziomu wsparcia do potrzeb pacjentów o różnych dysfunkcjach układu ruchu. Wspomagają proces przywracania zdolności ruchowych poprzez prowadzenie ruchów biernych, aktywno-pasywnych i aktywnych w rehabilitacji m.in.: po urazach rdzenia kręgowego (wspomagając trening odruchów oraz w ponownym uaktywnieniu połączeń nerwowo-mięśniowych), udarze mózgu czy rehabilitacji dzieci z porażeniem mózgowym (poprzez wspieranie procesu nauki prawidłowych wzorców ruchowych oraz zapobiegają deformacjom układu ruchu). Pomimo niewątpliwych zalet systemów robotycznych stosowanych w rehabilitacji takich jak dokładność w powtarzaniu ruchów terapeutycznych, możliwość precyzyjnego monitorowania postępów pacjenta czy redukcja obciążenia fizycznego terapeutów to pojawia się wiele wyzwań

wynikających z wysokich kosztów zakupu i eksploatacji specjalistycznego sprzętu, konieczność odpowiedniego szkolenia personelu medycznego czy ograniczonej dostępności w mniej zasobnych placówkach.

Także egzozskielety w rehabilitacji, zarówno te o pracy biernej jak i czynnej, stanowią nową jakość w leczeniu układu mięśniowo-szkieletowego. Pomimo ograniczeń w zastosowaniu wynikających, jak i w przypadków robotów rehabilitacyjnych, z wysokich nakładów na sam sprzęt oraz kształcenie personelu to posiadają one ogromne zalety umożliwiając pacjentowi wykonywanie ruchów w warunkach zbliżonych do naturalnych, wspierając proces odbudowy wzorców ruchowych oraz poprawiając komfort psychiczny pacjenta.

Roboty i egzozskielety w rehabilitacji kończyn górnych oferują znaczące korzyści, w tym precyzję, personalizację terapii oraz poprawę wyników leczenia. Pomimo wyzwań związanych z kosztami i dostępnością, technologie te mają potencjał, aby stać się standardowym elementem współczesnej rehabilitacji. Wraz z dalszym rozwojem tych systemów oraz spadkiem ich kosztów, możliwe jest ich szersze zastosowanie w codziennej praktyce medycznej.

Z tego względu uzasadnione jest prowadzenie prac mających na celu rozwijanie nowoczesnych metod rehabilitacyjnych z zastosowaniem robotów poprzez m.in. stworzenie bardziej efektywnych, spersonalizowanych i dostępnych terapii dla pacjentów z różnymi dysfunkcjami układu ruchu, co prowadzi do zwiększenia ich motywacji i zaangażowania w proces leczniczy.

Autor swoje opracowanie przedstawił łącznie na 148 stronach maszynopisu zawierającego tabele, rysunki i załączniki. Rozprawę podzielono na 7 rozdziałów zawierających: wstęp, przegląd literatury, cel i tezy pracy, opis systemu sterowania robota rehabilitacyjnego oraz walidację jego działania, wnioski z podsumowaniem. Rezultaty zilustrowano 103 rysunkami i 34 tabelami. Dodatkowo praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz piśmiennictwa oraz spis rysunków i tabel. Literatura liczy 64 pozycje, które wykorzystane są w pracy w sposób świadczący o dobrej znajomości podjętej tematyki.

We wprowadzeniu Doktorant przedstawił problematykę podjętą w rozprawie. Rozdział pierwszy rozprawy doktorskiej koncentruje się na znaczeniu rehabilitacji w przywracaniu funkcji utraconych w wyniku urazów lub chorób, zwłaszcza w kontekście kończyn górnych. Opisuje współczesne podejście do rehabilitacji jako procesu interdyscyplinarnego, obejmującego fizjoterapeutów, lekarzy, psychologów i inne specjalności. W rozdziale omówiono ewolucję robotów rehabilitacyjnych, dzieląc je na dwie główne kategorie: manipulatory oraz egzozskielety. Na koniec Autor podkreślił wyzwania dla konstruktorów, które wiążą się z projektowaniem robotów rehabilitacyjnych tj. z koniecznością pogodzenia uniwersalności z kosztami tych urządzeń. Autor podkreśla, że roboty rehabilitacyjne nie tylko wspierają proces terapeutyczny, ale również dostarczają danych diagnostycznych, takich jak zakresy ruchomości w stawach czy siła mięśni, co pozwala monitorować postępy pacjentów. Kolejny rozdział rozpoczyna się od historycznego spojrzenia na rozwój robotów od lat 80. XX wieku, kiedy to powstawały pierwsze systemy dedykowane zastosowaniom przemysłowym. W tym kontekście omawiane są standardy przemysłowe, takie jak magistrala CAN, która jest

szeroko wykorzystywana w komunikacji pomiędzy czujnikami a elementami wykonawczymi robotów. Autor opisuje także znaczenie nowoczesnych platform programistycznych, takich jak ROS (Robot Operating System), które umożliwiają elastyczne programowanie i symulacje scenariuszy pracy robotów, i który wspiera wiele języków programowania. W rozdziale zwrócono uwagę na wyzwania i decyzje projektowe związane z systemami sterowania. Omawia również znaczenie niezawodności i responsywności systemu sterowania, zwłaszcza w kontekście robotów rehabilitacyjnych, gdzie kluczowe jest zapewnienie bezpieczeństwa użytkownika oraz wykrywanie i sygnalizacja awarii. Rozdział ten stanowi pewną podstawę teoretyczną dla dalszych prac badawczych, szczególnie w kontekście projektowania modułowego systemu sterowania dla robotów rehabilitacyjnych, które są głównym tematem rozprawy. Skupienie się na specyficznych wymaganiach, takich jak integracja z oprogramowaniem czy optymalizacja dla warunków medycznych, ukazuje interdyscyplinarny charakter omawianego zagadnienia. Zabrakło natomiast szerszej analizy literatury dotyczącej systemów sterowania w robotyce rehabilitacyjnej. Analiza tego rozdziału daje pewien niedosyt, ponieważ brakuje w nim krytycznej analizy stanu wiedzy, z której wynikałyby pewne luki czy problemy wymagające nowego podejścia, na podstawie której można byłoby sformułować cel czy tezę dysertacji. Doktorant w zasadzie już w tym miejscu nakreślił zakres własnego rozwiązania systemu sterowania robota rehabilitacyjnego kończyny górnej.

Cel pracy oraz tezy, zostały przedstawione szczegółowo w kilku punktach. Kolejne rozdziały, czwarty i piąty, rozprawy doktorskiej dotyczą rozwiązań własnych Autora podejmowanego zagadnienia informatyczno-projektowego. Rozdział 4 zawiera szczegółowy opis systemu sterowania robota rehabilitacyjnego, w tym jego kluczowe założenia, który tworzy kompleksowy system łączący funkcjonalność, bezpieczeństwo i łatwość obsługi, wspierając proces rehabilitacji. Następnie przedstawiono szczegółową walidację systemu sterowania robota rehabilitacyjnego, uwzględniającą zarówno aspekty techniczne, jak i funkcjonalne.

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy, przedstawiona problematyka i zaproponowany sposób rozwiązania podjętych zagadnień pozwala stwierdzić, iż wybrany przez Doktoranta temat jest w pełni uzasadniony oraz aktualny poznawczo a szczególnie aplikacyjnie.

Recenzowana rozprawa mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria biomedyczna a podjętą w niej problematykę można zaliczyć do istotnego nurtu rozwoju współczesnej inżynierii rehabilitacyjnej i bioinżynierii.

2. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant zaproponował oryginalne podejście do rozwiązania problemu praktycznego dotyczącego rozwiniętego systemu sterowania robota w zastosowaniu w rehabilitacji układu ruchu.

Na podstawie przeanalizowanej literatury dotyczącej podjętego problemu, jak doświadczeń własnych dotyczących sterowania robotami medycznymi postawiono cel: **„Opracowanie modularnego systemu sterowania robota rehabilitacyjnego przeznaczonego**

do terapii kończyn górnych wykorzystującego sprzężenie siłowe do realizacji ruchów robota.” oraz sformułowano trzy tezy tj.:

1. Dane z czujników pomiarowych siły umieszczonych w poszczególnych węzłach robota rehabilitacyjnego można wykorzystać do automatycznej detekcji intencji ruchu w stawach kończyny górnej pacjenta oraz do sterowania trajektorią ruchu robota.
2. Wprowadzenie w algorytmie sterowania ruchami robota minimalnej siły wymaganej do aktywacji napędów przyczyni się do zwiększenia bezpieczeństwa pacjenta poprzez wyeliminowanie niepożądanych ruchów robota.
3. Wykorzystanie aplikacji sterującej działającej w systemie operacyjnym nie czasu rzeczywistego (ang.: non-real-time system), do kontroli pracy robota rehabilitacyjnego, nie wpłynie negatywnie na pracę systemu sterowania robota.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy chciałabym zaliczyć:

- Jednym z najistotniejszych efektów rozprawy jest stworzenie systemu sterowania dla rzeczywistego obiektu robota rehabilitacyjnego, w jego nowej wersji ARM-200 (będącego rozszerzeniem wersji ARM-100).
- Walidację układu pomiarowego siły jako kluczowego elementu testów systemu sterowania robota rehabilitacyjnego. Precyzyjny pomiar siły odgrywa istotną rolę w bezpieczeństwie i efektywności terapii. Testy statyczne i dynamiczne przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, umożliwiły kalibrację i ocenę dokładności czujników siły w projektowanym systemie.
- Przeprowadzenie testów i walidacji systemu dla robota w pełnej konfiguracji z osobą w roli pacjenta, które potwierdziły, że system spełnia wymagania w zakresie precyzji i niezawodności.
- Możliwość wdrożenia robota rehabilitacyjnego do praktyki terapii układu ruchu.
- Umiejętne wykorzystanie metod badawczych i analitycznych, w celu realizacji postawionych zadań badawczych.
- Wyraźnie sformułowane cel badawczy i tezy oraz konsekwentnie rozwiązane zadania szczegółowe.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty aplikacyjne. Pracą swoją Doktorant włączył się w ważny nurt prac nad rozwojem nowych technik wspomagających rehabilitację układu ruchu człowieka. Doktorant wykazał się gruntowną znajomością tematyki oraz doświadczeniem w rozwiązywaniu złożonych problemów o charakterze praktycznym.

Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny. Tworzenie robotów rehabilitacyjnych wymaga innowacji w mechanice, elektronice, informatyce i systemach sterowania. Wyniki prac i badań nad nowymi rozwiązaniami robotów rehabilitacyjnych mogą być wykorzystywane także w innych obszarach inżynierii biomedycznej, takich jak protetyka czy diagnostyka medyczna.

3. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Chciałabym przedstawić pewne wątpliwości i uwagi krytyczne, które nasunęły mi się po zapoznaniu się z recenzowaną pracą. Najważniejsze z nich to:

- W rozdziale drugim zabrakło przeprowadzenia szerszej czy też bardziej wnikliwej, analizy stanu wiedzy oraz nie przeprowadzono żadnej krytycznej oceny stosowanych systemów sterowania urządzeń robotycznych w rehabilitacji. Stąd pytanie na jakiej podstawie, poza doświadczeniem własnym, zostały przyjęte założenia do stworzenia nowego systemu sterowania?
- Dużym ograniczeniem pracy jest zastosowanie czujników elektromiograficznych naklejanych na kończynę górną pacjenta. Nawet niewielkie zmiany w położeniu czujnika może wpływać na czułość pomiaru i rejestrowane dane. Czy Doktorant uwzględnił w swojej koncepcji systemu sterowania, błędy wynikające z tego faktu. Dlaczego nie można czujników wbudować w konstrukcję ramienia robotycznego?
- W pracy zabrakło przedstawienia zakresów ruchomości samego robota.
- Ruchomość stawu łokciowego robota ARM-200 została mocno ograniczona poprzez możliwość realizacji jedynie ruchu zgięcia i wyprostu, podczas gdy w stawie tym mamy do czynienia z dużo bardziej złożonym ruchem. Jaki wpływ to uproszczenie ma na ruchomość stawu nadgarstka?
- Dlaczego walidacja „w trybie śledzenia ruchu” systemu sterowania została wykonana jedynie dla stawu łokciowego, w którym symulowano jedynie ruch zgięcia i wyprostu. Bardziej interesujące możliwości analizy umożliwiłaby wybór stawu barkowego lub nadgarstka. Czym uzasadniono wybór badanego węzła kinematycznego?
- W pracy występuje bardzo dużo błędów typograficznych (tzw. sieroty).

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty zarówno aplikacyjne, jak i poznawcze, które znacząco wzbogacają dyscyplinę inżynierii biomedycznej. Rozprawa podejmuje kluczowe wyzwania związane z projektowaniem i rozwojem systemów sterowania w robotach rehabilitacyjnych, jednocześnie wnosząc nowe rozwiązania, które mogą znaleźć zastosowanie w praktyce klinicznej.

Dobór metod projektowych i badawczych został przemyślany, co świadczy o głębokim zrozumieniu problematyki badawczej i zdolności do definiowania celów w sposób umożliwiający ich skuteczną realizację. Wykorzystanie zaawansowanych technik inżynierskich, takich jak analiza kinematyczna, modelowanie systemów sterowania, implementacja algorytmów sterujących oraz ich walidacja eksperymentalna, podkreśla wysoki poziom kompetencji Doktoranta.

Warto również podkreślić, że praca ma wymiar praktyczny i aplikacyjny, ponieważ opracowane rozwiązania mogą być zastosowane w procesach rehabilitacyjnych, wspierając pacjentów oraz personel medyczny w codziennej praktyce. Rozprawa pokazuje, że Doktorant potrafi łączyć teorię z praktyką, a także efektywnie komunikować swoje wyniki, co stanowi istotny atut w pracy badawczej.

Biorąc pod uwagę przedstawiony mi do zaopiniowania materiał, oryginalność rozwiązanego w rozprawie zagadnienia, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności prowadzenia pracy naukowej i badawczej przez Doktoranta uważam, że przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów odpowiedniej Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Andrzeja Michnika do publicznej obrony opiniowanej pracy w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'T. 2002', with a long horizontal line extending to the left from the top of the signature.