

Prof. dr hab. inż. Mirosław Pajor
Wydział Mechatroniki i Elektrotechniki
Politechnika Morska w Szczecinie
Ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin

Recenzja pracy doktorskiej pt.” Possibilities and efficacy of including ICT technologies in robot-aided distant home rehabilitation” autorstwa mgr inż. Piotra Falkowskiego.

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej Prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego zgodnie z Uchwałą nr 801/II/2024 z dnia 17.09.2024.

1. Przedstawienie treści pracy

Szeroko pojęta robotyzacja i automatyzacja obejmuje coraz szersze obszary aktywności człowieka. Robotyzacja i automatyzacja wkracza również w zagadnienia medycyny i rehabilitacji. Zaawansowane technologie medyczne korzystają z osiągnięć automatyki i robotyki. Rozwijane są nowe systemy diagnostyki medycznej bazujące na osiągnięciach elektroniki, technik komputerowych oraz zaawansowanych algorytmów przetwarzania sygnałów i danych. Budowane są zaawansowane bioniczne protezy organów ludzkich sterowane sygnałami pobieranymi z organizmu, z mięśni lub mózgu. Prowadzi się zaawansowane badania nad robotami do wspomagania operacji chirurgicznych. Projektowane jest też dużo urządzeń do celów rehabilitacyjnych o różnym poziomie automatyzacji. Bardzo dużym zainteresowaniem nauki wykazują konstrukcje egzoszkieletowe, inaczej zwane robotami ubieralnymi (Wearable Robots). Rozwiązania te stosowane są do zdalnego sterowania maszyn, do wspomagania siły operatora (często o profilu militarnym) oraz w rehabilitacji i wspomaganiu pacjentów z problemami ruchowymi.

W tej tematyce realizowana jest rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Falkowskiego. Autor przeprowadził szeroką analizę problematyki rehabilitacji kończyny górnej pacjentów z różnymi problemami ruchowymi. Na tej podstawie zaprojektował własną, oryginalną konstrukcję egzoszkieletu o pięciu stopniach swobody z trzema parami kinematycznymi napędzanymi. Ponadto opracowano układ sterowania egzoszkieletu oraz kilka rodzajów interfejsów dla pacjenta poczynając od prostego panelu do rozwiązań z zastosowaniem technologii VR. Autor przeprowadził następnie szereg badań eksperymentalnych zaprojektowanego egzoszkieletu, w których do oceny efektywności zastosował sygnały EMG rejestrowane dla różnych grup mięśniowych pacjenta. Badania doświadczalne umożliwiły wyciągnięcie wniosków i ocenę efektywności działania zaproponowanej, zrobotyzowanej metody rehabilitacji kończyny górnej.

Opiniowana praca doktorska jest napisana w języku angielskim i liczy 112 strony oraz 198 stron załączników. Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu symboli i skrótów oraz tabel i rysunków. W załącznikach Autor dołączył treści 14 artykułów, rysunek złożeniowy konstrukcji egzoszkieletu, potwierdzenie złożenia wniosku o ochronę patentową, postery prezentujące egzoszkielet, dyplomy i nagrody związane z realizowanymi badaniami oraz certyfikaty etycznej oceny realizowanych badań z udziałem ludzi. Ponadto rozprawa zawiera spis źródeł literaturowych obejmujący 154 cytowane pozycje literaturowe. Dobór źródeł jest prawidłowy, zawiera najnowsze pozycje literaturowe i nie budzi zastrzeżeń. Autor przeanalizował dostępne źródła i wyciągnął poprawne wnioski podsumowujące stan wiedzy. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: przegląd stanu wiedzy, uzasadnienie celowości badań, plan metodyczny badań oraz trzy rozdziały merytoryczne zakończone rozdziałem końcowym z wnioskami krytycznymi i omówieniem perspektyw dalszych badań.

W pierwszych rozdziale rozprawy Autor wprowadza w tematykę egzoszkieletów w zastosowaniu do fizjoterapii. Omawia metody fizjoterapii dla różnych przypadków: po udarze mózgu, chorobach ortopedycznych, po wypadkach i po innych zaburzeniach neurologicznych. Autor porusza problemy leczenia domowego na odległość i omawia problemy rehabilitacji wspomaganej robotem. Ponadto Autor omawia technologie informatyczno-komunikacyjne stosowane z rehabilitacji. Dyskutowane są technologie VR, zastosowanie sygnałów biologicznych EEG ENG i FES oraz zastosowanie sztucznej inteligencji. Autor wskazuje, że egzoszkielety z dodatkowym pakietem ITC są predysponowane do zdalnej fizjoterapii.

W rozdziale drugim Autor zaprezentował cel realizowanej pracy oraz główne hipotezy. Postawiono dwie hipotezy, pierwsza z nich zakłada, że *egzoszkielet rehabilitacyjny obciąża układ mięśniowo-szkieletowy pacjenta w sposób porównywalny do fizjoterapeuty*. Druga teza zakłada, że wykorzystanie *wizualizacji ruchu VR/AR zapewnia lepszą dokładność podążania za ścieżką ruchu*. Postawiony cel jest ambitny a sformułowane hipotezy są interesujące z naukowego punktu widzenia.

W rozdziale trzecim Autor przedstawia harmonogram realizowanych prac badawczych. Ponadto zaprezentowano narzędzia informatyczne wykorzystywane w poszczególnych etapach prac.

W rozdziale czwartym Autor zaprezentował proces projektowania warstwy mechanicznej egzoszkieletu, począwszy od projektu koncepcyjnego, opracowania założeń konstrukcyjnych, obliczeń wytrzymałościowych, kończąc na projekcie wykonawczym. Ponadto przedstawiono projekt warstwy elektrycznej, systemu sterowania oraz interfejsu komunikacyjnego HMI. Autor zaprezentował również wyprowadzenie równań zagadnienia prostego kinematyki.

W rozdziale piątym Autor opisał technologie informatyczne i komunikacyjne zastosowane do sterowania egzoszkieletem. Omówiono zastosowanie sztucznej inteligencji (sztucznych sieci neuronowych) do sterowania predykcyjnego. Ponadto zaproponowano pomiar sygnałów EMG, z wybranych partii mięśniowych, do monitorowania postępów w rehabilitacji. Dodatkowo szczegółowo zaprezentowano interfejs HMI używany przez pacjenta oraz potencjalną możliwość wykorzystania technologii cyfrowego bliźniaka.

W szóstym rozdziale Autor przedstawił syntetycznie wyniki badań eksperymentalnych. W ramach pracy przeprowadzono szereg testów skuteczności działania systemu rehabilitacji z zastosowaniem robota ubieralnego. Przyjęto wskaźniki oceny skuteczności działania systemu na podstawie rejestrowanych danych z czujników EMG. Na podstawie tych danych oszacowano wartość przyjętych wskaźników. Dokonano oceny poprawności działania robota i wspomagania VR.

W ostatnim rozdziale siódmym Autor dokonał podsumowania rezultatów pracy i przedstawił wnioski końcowej oceny uzyskanych wyników i prawdziwości przyjętych w rozprawie hipotez. Ponadto przedstawiono plany dalszych działań nad rozwojem zaproponowanej, zrobotyzowanej fizjoterapii kończyny górnej człowieka.

Podsumowując należy stwierdzić, że na podstawie zaprezentowanej analizy wyników badań eksperymentalnych Autor rozwiązał postawiony problem naukowy i wykazał

skuteczność działania opracowanej konstrukcji w warunkach rzeczywistego procesu fizjoterapeutycznego, czym wykazał słuszność jednej z postawionych hipotez, a na podstawie równolegle prowadzonych badań ankietowych pacjentów uczestniczących w badaniach eksperymentalnych, zaprzeczył słuszności drugiej z postawionych hipotez.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Praca doktorska Pana Piotra Falkowskiego ma charakter innowacyjny. Autor rozwiązuje szereg problemów multidyscyplinarnych z zakresu robotyki, inżynierii mechanicznej, automatyki i technologii informatycznych. Autor posiada dużą wiedzę inżynierską oraz w dziedzinie automatyki i nowoczesnych technologii informatycznych (cyfrowe bliźniaki, sztuczna inteligencja). Ponadto Autor posiada dużą biegłość w prowadzeniu badań eksperymentalnych o profilu medycznym. Recenzowana praca doktorska ma silny aspekt eksperymentalny. Autor przeprowadził bardzo dużą ilość testów eksperymentalnych i badań ankietowych z udziałem grupy ochotników, którzy wyrazili zgodę na udział w eksperymencie. Autor uzyskał wszystkie wymagane zgody na badania z udziałem ludzi. Wyniki pracy badawczej mgr inż. Piotra Falkowskiego dostarczają innowacyjnego narzędzia do wspomagania procesów fizjoterapii z zastosowaniem robota ubieralnego (Wearable Robots) wspomagającego zdalny proces rehabilitacji kończyny górnej. Należy również zaznaczyć, że Autor w celu walidacji poprawności działania proponowanego rozwiązania, przeprowadził szereg badań eksperymentalnych i ankietowych, wykazując przy tym wysokie umiejętności planowania tych badań. Zrealizowane testy doświadczalne potwierdził zadowalającą skuteczność działania opracowanej konstrukcji egzoszkieletu. Ponadto wskazano nie tylko dobre strony rozwiązania ale również aspekty, które wymagają korekty zanim dojdzie do wdrożenia rozwiązania. Zaplanowane zadania Autor zrealizował konsekwentnie, a uzyskane rezultaty poddał stosownej analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Zaprojektowana, wykonana i poddana testom konstrukcja robota ubieralnego – egzoszkieletu, do wspomagania procesów zdalnej fizjoterapii.
2. Uzyskane na drodze testów eksperymentalnych, opracowane wyniki badań z zastosowaniem pomiarów aktywności mięśniowej EMG, które stanowią bazę wiedzy krytycznie wskazującą wady i zalety danej klasy rozwiązań robotów ubieralnych.

3. Uzyskane na drodze badań testowych z równolegle prowadzonymi badaniami ankietowymi, opracowane wyniki badań, które krytycznie wskazują wady i zalety interfejsów komunikacyjnych człowiek-maszyna bazujących na cyfrowych bliźniakach i technologii VR.

Wysoko oceniam oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy wymienionych osiągnięć.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Str. 38, rys.3 – Czy pozostawienie nienapędzanych stopni swobody DOF3 i DOF5 nie ogranicza możliwości rehabilitacyjnych egzoszkieletu ? Czy to działanie wynika z analiz stosowanych terapii, czy tylko wynika z potrzeby obniżenia masy urządzenia? Co z dwoma stopniami w nadgarstku, czy ćwiczenia rehabilitacyjne pozwalają unieruchomić ten przegub?
2. Na str. 51 Autor wspomina, że obliczenia zagadnienia odwrotnego kinematyki wykonano w systemie Simulink. Czy Autor skorzystał z rozwiązania typu numerycznego, czy wyznaczył zagadnienie odwrotne kinematyki w postaci jawnej? Wszystkie roboty stosowane w praktyce przemysłowej mają jawne rozwiązanie ZOK.
3. Str. 55 – Autor napisał, że podjął próbę zastosowania sieci NARX do sterowania predykcyjnego. Celem tych działań jest dokładniejsze sterowanie egzoszkieletem z ramieniem rehabilitowanego. Rozumiem, że chodzi o wyznaczanie momentów napędowych. Czy to jest możliwe bez jakiegokolwiek pomiaru sił na konstrukcji egzoszkieletu?
4. Na str. 57 Autor stwierdza, że zastosował do obróbki sygnałów EMG dwa filtry: górnoprzepustowy 50 Hz i dolnoprzepustowy 500 Hz. Po co jest filtr górnoprzepustowy z niższym pasmem odcięcia od filtra dolnoprzepustowego. Czy chodziło o zachowanie pasma częstotliwościowego w granicach od 50 do 500 Hz. Czy na pewno jest to właściwe pasmo dla sygnałów z EMG? Wydaje się, że częstotliwości ruchu ramieniem, a zatem i zmian sygnałów EMG są poniżej 50 Hz, a zostanie to wyfiltrowane filtrem górnoprzepustowym.
5. Na str. 61 Autor wspomina o badaniach nad cyfrowym bliźniakiem ale stwierdza, że to robione było w innym projekcie i realizował badania student. Generalnie w wielu miejscach pracy Autor stosuje taki układ, że szczegóły są opisane w dołączonym w

załączniku artykule. Jednakże wiele z tych artykułów jest współautorskich i nie ma informacji co jest indywidualnym wkładem Autora. Taka sytuacja zdecydowanie utrudnia ocenę rozprawy doktorskiej.

6. Na str. 71, rys.26 i 27 – nie do końca rozumiem, co na tym wykresie się dzieje. Widać dwie fazy, faza pierwsza do 40 sekundy – urządzenie przyjęło pozycję ok. 40 stopni i się nie porusza, a pacjent cały czas pracuje mięśniami. Faza druga po 40 sekundzie – urządzenie cyklicznie zmienia kąt od 10 do 40 stopni. Sygnał EMG 2 ma małą aktywność, a sygnał EMG 1 reaguje silniej na ruch ale na rys.26 wyraźnie wyprzedza ruch urządzenia, a na rys.27 mam wrażenie, że spóźnia się za ruchem urządzenia. Proszę o szczegółowe wyjaśnienie tego co obserwujemy na wykresach 26 i 27.
7. Na str.72 rys.28 i 29 – również mam problem z interpretacją rysunku. Wygląda na to, że urządzenie działa sobie a pacjent dopiero od 38 do 55 sekundy zaczyna współpracować i sygnał jest opóźniony w stosunku do urządzenia.
8. Natomiast na str.75 i 76 rys.34 i 36, na tych wykresach sygnał prawdopodobnie ma tak niski poziom, że chyba poruszamy się w przedziale niepewności pomiarowej?
9. Str. 85 – Autor z jednej strony pisze w rozdziale 6.8 punkt 2, że „*wykorzystanie VR/AR zapewnia lepsze dokładności podążania za ścieżką ruchu*” a zaraz po tym, że zastosowanie VR nie jest korzystne, i że teza 2 została odrzucona. Skoro VR zapewnia lepsze dokładności to teza 2 jest potwierdzona, a to że ktoś ma problemy lokomocyjne to inna para kaloszy – trzeba coś zrobić z chorobą lokomocyjną.
10. Str. 89 – Autor sam zwrócił uwagę, że zaprojektowany egzoszkielec jest w wersji pasywnej. Realizuje określony ruch i prowadzi ramię pacjenta nie wchodząc z nim w interakcję. Nie ma on bowiem żadnych sensorów siły i nie jest w stanie wykryć aktywności pacjenta. Zatem należy zaznaczyć, że w stwierdzeniu iż egzoszkielec ten jest porównywalny do terapii z fizjoterapeutom, słowo „porównywalny” należy ująć w cudzysłów. Fizjoterapeuta jest jednak układem aktywnym (nie chodzi mi tu o dodatkowe obciążenia) – wspomaga pacjenta, gdy ten nie daje rady wykonać danej partii ruchu i pozwala na samodzielne działanie gdy pacjent daje radę. Zaprojektowany egzoszkielec wykonuje zaprogramowany ruch nie kontrolując interakcji z pacjentem. Zatem przed Autorem rozprawy stoi jeszcze bardzo trudne zadanie na przyszłość, bowiem zaprojektowanie takiego układu z siłowym sprzężeniem zwrotnym i kontrolą aktywności mięśni w pętli sterowania to bardzo poważne wyzwanie.

Tekst pracy został napisany starannie, część edytorska pracy jest na wysokim poziomie. W trakcie czytania pracy zauważyłem tylko nieliczne błędy edycyjne:

1. Na str. 47, rys.12 słaba jakość rysunku niewidoczne oznaczenia osi. Warto zaznaczyć , w którym układzie odniesienia działają siły wymienione w tabeli 6.
2. Na str. 49, rys.14 szkoda, że nie wprowadzono na rysunku odnośników z numerami elementów, które korespondują z opisem.
3. Na str. 57, rys.18 słaba jakość rysunku niewidoczne opisy.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Zrealizowana przez mgr. inż. Piotra Falkowskiego praca charakteryzuje się wysokim poziomem innowacyjności oraz ma potencjał wdrożeniowy. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu badawczego, wnosi nową wiedzę w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, oraz wskazuje na duży poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. **Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.**

