

Prof. dr hab. inż. Jolanta Pauk
Politechnika Białostocka
Instytut Inżynierii Biomedycznej
Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: j.pauk@pb.edu.pl, tel. 510 034 086

Białystok, 14.05.2024

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Rokseli „Analysis of biomechanical and bioelectric parameters for the needs of automation of diagnostics and rehabilitation of patients”

Recenzję opracowano na podstawie pisma Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna prof. dr. hab. inż. Ewy Piętki z dnia 03.04.2024 r. Praca doktorska została przygotowana pod opieką naukową promotora prof. dr. hab. inż. Jarosława Śmiei.

1. Temat rozprawy

Praca dotyczy automatyzacji platformy eksperckiej do wspierania, doskonalenia i automatyzacji procesów diagnostycznych i rehabilitacyjnych. Jednym z największych obecnie problemów jest zbyt mała liczba fizjoterapeutów przy ciągle rosnącej grupie pacjentów wymagających rehabilitacji. Nowoczesne podejście do rehabilitacji, rozszerzające możliwości terapii oraz podwyższające jej efektywność, przewiduje zastosowanie w procesie rehabilitacji systemów robotycznych. Roboty na miarę XXI wieku stanowią krok milowy w terapii pacjentów z dysfunkcjami ruchowymi. Umożliwiają przeniesienie części rehabilitacji z ośrodka lub oddziału dziennego do rehabilitacji domowej lub telerehabilitacji, również w postaci tzw. modelu hybrydowego, w którym kilkutygodniowe cykle rehabilitacji domowej przeplatają się z rehabilitacją ambulatoryjną. Dotyczy to jednak różnych form rehabilitacji długoterminowej, np. kardiologicznej czy geriatrycznej. Pomimo znacznego postępu w obszarze systemów sterowania robotami rehabilitacyjnymi, trudno w najbliższym czasie spodziewać się znaczącej, skokowej zmiany w ich samodzielności, co stanowi jeden z czynników ograniczających. W takim świetle przyjęty przez Doktorantkę problem

zastosowania robotów w codziennej rehabilitacji jawi się jako ważny i uzasadniony w kontekście poszukiwania nowych dróg prowadzących do rozwoju robotyki rehabilitacyjnej. Zatem wybór tematu pracy doktorskiej uważam za trafny, zgodny z kierunkiem współczesnych badań naukowych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna i aktualnym stanem wiedzy. Jednak mam też drobne zastrzeżenie. Moim zdaniem, tak sformułowany temat narzuca konieczność analizy wielu parametrów biomechanicznych i bioelektrycznych na potrzeby automatyzacji diagnostyki i rehabilitacji pacjentów i wybór tych najistotniejszych, prowadzących do realizacji celu. Doktorantka w pracy ograniczyła się jednak do kilku powszechnie stosowanych, bez uzasadnienia czym kierowała się dokonując wyboru.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej i formalnej strony

Recenzowana praca ma objętość 116 stron i została przygotowana w języku angielskim. Składa się z pięciu rozdziałów, które poprzedzają streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń, spis treści, a całość wieńczy spis literatury. Doktorantka przestudiowała i zacytowała odpowiednią liczbę źródeł bibliograficznych - 151 pozycji, w tym 7 publikacji, których jest współautorką. Jest to dowód na odpowiednią wiedzę teoretyczną i dobrą orientację w zakresie zagadnień będących przedmiotem rozprawy doktorskiej. Tekst pracy zawiera typowe dla opracowań naukowych rozdziały, z zachowaniem odpowiednich proporcji.

Od wielu lat prowadzone są badania w zakresie skuteczności różnych metod rehabilitacji z zastosowaniem nowoczesnych technologii na wybranych grupach pacjentów. Problem zatem nie jest nowy, mimo tego mgr inż. Anna Rokseła uczyniła go przedmiotem własnych analiz badawczych, identyfikując problemy do rozwiązania, spośród których należy wymienić brak jednoznacznych dowodów potwierdzających skuteczność metodologii, ocen i protokołów leczenia w diagnostyce i interwencjach terapeutycznych wspomaganych robotami. W podjętej przez Autorkę problematyce badawczej sformułowano cel i dwie hipotezy badawcze. Cel naukowy pracy stanowi **opracowanie podstaw metodologicznych dla zautomatyzowanej platformy eksperckiej do wspierania, doskonalenia i automatyzacji procesów diagnostycznych i rehabilitacyjnych**. Koresponduje on w pełni z hipotezami. Pierwsza z hipotez jest następującej treści: *„Dane z elektromiografii, momentu obrotowego i pozycji kończyny górnej, generowane przez pacjenta podczas procesu rehabilitacji wspieranego systemem robotycznym pozwalają na obiektywną diagnostykę stanu*

pacjenta.” Druga z kolei zakłada, że „*dane EMG uzupełnione o pomiary momentu obrotowego i położenia, w stosownych przypadkach, dostarczają kompletnego zestawu sygnałów ułatwiających skuteczną rehabilitację opartą na biofeedbacku również w rozwiązaniach telemedycznych.*” Pewnym niedociągnięciem jest identyfikacja celu pracy i hipotez badawczych bez wcześniejszego studium literatury.

Analiza stanu wiedzy została przeprowadzona dopiero w rozdziale drugim. Dotyczyła ona biomechanicznych i bioelektrycznych parametrów stosowanych w diagnostyce i rehabilitacji; automatyzacji w diagnostyce i rehabilitacji; robotów rehabilitacyjnych; EMG biofeedbacku, gamifikacji i sztucznej inteligencji w rehabilitacji. W tym miejscu chciałabym wskazać, iż Doktorantka nie poświęciła wystarczającej uwagi rozwiązaniom robotycznym w kontekście przeglądu robotów do rehabilitacji, rodzaju terapii wspomaganej robotami, a przede wszystkim ich skuteczności, wpływu czasu trwania, częstotliwości i intensywności treningu.

Należy podkreślić trafnie dobraną do realizacji wyżej sformułowanego celu metodykę pracy, następnie zaplanowanie i wykonanie badań adekwatnymi do zaproponowanej metodyki urządzeniami i technikami. W ramach realizacji przyjętego w dysertacji celu i weryfikacji przyjętych hipotez badawczych przeprowadzono badania własne, z wykorzystaniem urządzeń Luna EMG i Stella BIO, współfinansowane z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, Agencji Badań Medycznych oraz Ministerstwa Edukacji i Nauki. Podczas badań eksperymentalnych Autorka pozyskała dane elektromiograficzne (EMG), momentu obrotowego i położenia kończyny z poszczególnych grup pacjentów tj. osób zdrowych (grupa kontrolna); pacjentów po udarze mózgu oraz pacjentów z nietrzymaniem moczu. Dane uzyskane z urządzeń pomiarowych uzupełniono stosownymi testami klinicznymi. Pomiarom podlegały następujące parametry:

- izokinetyczna siła mięśniowa bicepsa i tricepsa podczas zgięcia i wyprostów łokcia (diagnostyka dynamometryczna) - 10 osób zdrowych i 10 pacjentów po udarze mózgu;
- spastyczność i sztywność mięśni - 68 osób zdrowych i 116 pacjentów po udarze mózgu;
- biofeedback EMG dla mięśni dna miednicy w ramach telerehabilitacji - 20 kobiet;
- skuteczność wykorzystania ruchu wyzwalanego z poziomego sygnału EMG w rehabilitacji stawu kolanowego u pacjentów po udarze mózgu przy użyciu robota rehabilitacyjnego - 7 pacjentów.

Wyjaśnienia wymaga dobór i wielkość próby badawczej. Niewątpliwie słabą stroną przedłożonej rozprawy jest brak załączonych przykładowych protokołów diagnostycznych i terapeutycznych.

W rozdziale czwartym pracy przedstawiono wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Autorka zaprezentowała obszerny materiał w postaci tabel, rysunków i wykresów, przedstawiając szczegółowo i przejrzysto uzyskane rezultaty. Ich omówienie jest rzeczowe oraz w odpowiednim stopniu syntetyczne, co pomaga odbiorcy odczytać najistotniejsze rezultaty badania. Przedstawione szczegółowo w kolejnych czterech podrozdziałach wyniki badań własnych Autorki objęły odpowiednio izokinetyczną siłę mięśniową podczas zgięcia i wyprostowania łokcia u osób zdrowych i pacjentów po udarze mózgu, spastyczność i sztywność mięśni u osób zdrowych i pacjentów po udarze mózgu, biofeedback EMG dla mięśni dna miednicy w ramach telerehabilitacji oraz skuteczność wykorzystania ruchu wyzwalanego z poziomu sygnału EMG w rehabilitacji stawu kolanowego u pacjentów po udarze mózgu przy użyciu robota rehabilitacyjnego. Analiza przedstawionych w pracy wyników badań, wraz z towarzyszącymi opisami i konstatacjami, wskazuje na poprawność sformułowanych uogólnień o charakterze poznawczym i aplikacyjnym, poszerzających wiedzę w zakresie rehabilitacji. Aspekt dotyczący zastosowanych technik uczenia maszynowego do klasyfikacji pacjentów jest interesujący, ale nie wystarczająco opisany, szczególnie w kontekście kryterium wyboru parametrów wejściowych, doboru algorytmów, a także prezentacji uzyskanych wyników. Na podkreślenie zasługuje dyskusja na końcu każdego rozdziału/podrozdziału, w której Doktorantka wykazała się dojrzałością naukową i zdolnością do kompleksowej interpretacji uzyskanych przez siebie wyników na tle danych piśmiennictwa.

Rezultaty badań pozwoliły Autorce zweryfikować pozytywnie sformułowane hipotezy badawcze. Niniejsza rozprawa daje podstawę do prowadzenia dalszych badań, ale Autorka nie wskazuje istotnych kierunków. Sugeruje jedynie konieczność zwiększenia liczebności grup badawczych oraz rozszerzenie metodyki badawczej o dodatkowe protokoły (diagnostyczne i leczenia) oraz parametry.

Przedstawione metody, co do zasady, są aktualne i adekwatne do rozwiązania problemów naukowych. Pojawiło się jednak kilka zagadnień, które w mojej opinii wymagają wyjaśnienia lub przedyskutowania:

1. Jakie czynniki współtowarzyszące wzięto pod uwagę podczas terapii z użyciem robota rehabilitacyjnego Luna EMG?
2. Czy wykorzystywane w robocie Luna EMG ćwiczenia powtarzane są najlepszą formą usprawniania w zależności od ich parametrów: intensywności, dokładności, liczby powtórzeń?
3. Ruch pasywny oraz pasywna aktywacja mięśni bez stowarzyszonej koordynacji ruchów może być niewystarczająca do optymalizacji efektów usprawniania. Jakie przyjęto kryterium optymalizacji do oceny efektów postępowania terapeutycznego z wykorzystaniem Luna EMG?
4. W rzeczywistej praktyce klinicznej trudno oddzielić efekt wykorzystania robotów rehabilitacyjnych od efektów synergii pozostałych oddziaływań np. z klasyczną fizykoterapią i kinezyterapią. W związku z tym wyniki zrobotyzowanej terapii grupy mięśniowej za pomocą systemu robotycznego mogą znacząco różnić się od wyników usprawniania w ramach całych strategii terapeutycznych. Ta kwestia wymaga dyskusji podczas obrony rozprawy doktorskiej.
5. W jaki sposób został rozwiązany problem bezpieczeństwa robota rehabilitacyjnego wykorzystywanego w rehabilitacji pacjentów?
6. Jakie są wskazania i przeciwwskazania do rehabilitacji pacjentów z wykorzystaniem robota Luna EMG?
7. Proszę o precyzyjne wskazanie zastosowanych metod przetwarzania sygnału EMG w dziedzinie czasu. Czy podjęto próbę przetwarzania sygnału EMG w dziedzinie częstotliwości?
8. Czy dokonano oceny poziomu satysfakcji pacjentów poddanych rehabilitacji z wykorzystaniem systemu robotycznego?

3. Podsumowanie

Rozwijanie robotyki rehabilitacyjnej jest konieczne, ponieważ skomplikowane funkcje ludzkiego ciała z nieskończoną liczbą możliwych kombinacji ruchu są niełatwe do odtworzenia przez człowieka, a tym bardziej trudne do wielogodzinnego powtarzania bez zmęczenia terapeuty. Oczywiście nie można zapominać o roli człowieka w procesie terapii. Połączenie pracy terapeuty z pracą robota jest zatem nieodzownym elementem.

Badania prowadzone przez Doktorantkę pozwoliły zrealizować założone cele. Tezy postawione na początku pracy stanowiły podstawę opracowania nowatorskiego podejścia łączącego postęp technologiczny z praktykami klinicznymi w rehabilitacji pacjentów, a wykonane analizy umożliwiły potwierdzenie tych tez.

W podsumowaniu pragnę podkreślić, że wyniki opisane w recenzowanej rozprawie doktorskiej są interesujące i istotne z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego, gdyż otwierają perspektywy praktycznego zastosowania urządzeń robotycznych w rehabilitacji. Oryginalnym elementem rozprawy jest opracowanie innowacyjnego podejścia do rehabilitacji pacjentów z zastosowaniem urządzenia robotycznego Luna EMG.

Przedstawione w recenzji uwagi mają charakter marginalny i nie umniejszają wartości rozprawy. Recenzowana praca napisana została w sposób wskazujący na odpowiednią wiedzę teoretyczną i praktyczną oraz umiejętność interpretacji wyników przez mgr inż. Annę Rokselę.

4. Wnioski końcowe

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Anny Rokseli nt. *Analysis of biomechanical and bioelectric parameters for the needs of automation of diagnostics and rehabilitation of patients* spełnia formalne i zwyczajowe wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742, z późn. zm). Wniosuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

