

WPLYNĘŁO

2024 -12- 0 6

dn.....



ŚLĄSKI
UNIwersytet
MEDYCZNY
W KATOWICACH

Zabrze 02.12.2024 r.

dr hab. n med. **Zbigniew Nawrat**

Zakład Biofizyki Katedry Biofizyki

Wydział Nauk Medycznych w Zabrzu

Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

41-808 Zabrze ul. H.Jordana 19

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Falkowskiego

pt. „Możliwości i efektywność włączenia technologii ICT do zdalnej zrobotyzowanej rehabilitacji domowej”

„Possibilities and efficacy of including ICT technologies in robot-aided distant home rehabilitation”

wykonanej pod opieką promotora: Cezarego Rzymkowskiego, PhD, Eng., WUT

i opiekuna pomocniczego: Zbigniewa Pilata, PhD, Eng.

Uchwałą Rady Dyscypliny zostałem powołany na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgr. inż. Piotra Falkowskiego

Dziedzina robotyki medycznej, w szczególności w zakresie rehabilitacji, cieszy się rosnącym zainteresowaniem zarówno w środowisku pracowników usług medycznych, jak i wśród pacjentów. Jest to obszar o wyjątkowej dynamice rozwoju, który łączy interdyscyplinarną wiedzę z zakresu biomechaniki, inżynierii i technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT). Postęp w tej dziedzinie umożliwia tworzenie zaawansowanych rozwiązań, które nie tylko wspierają procesy rehabilitacyjne, ale również czynią je bardziej dostępnymi i efektywnymi. Wprowadzenie nowoczesnych technologii do rehabilitacji zdalnej i wspomagananej robotycznie

otwiera nowe możliwości dla sektora zdrowia, zarówno pod względem poprawy jakości opieki, jak i efektywności kosztowej.

Szczególne miejsce w zakresie badań możliwości odnosi się do telemedycyny z zastosowaniem robotów rehabilitacyjnych. Wydaje się, że nie ma żadnych wątpliwości, że w większości przypadków medycznych korzystna jest możliwość rehabilitacji nadzorowanej na odległość przez fachowców, ale przebiegających w domu pacjenta. Dlatego warto już na wstępie pogratulować wyboru tematyki projektu i doktoratu.

W obliczu rosnącego zapotrzebowania na narzędzia ułatwiające realizację złożonych procesów rehabilitacyjnych w warunkach domowych, kluczowym wyzwaniem staje się opracowanie rozwiązań, które będą intuicyjne w obsłudze, skuteczne, a jednocześnie dostępne finansowo. W Polsce obserwujemy dynamiczny rozwój tego sektora, zarówno w kontekście badań naukowych, jak i wdrażania innowacji na rynek. Prace naukowe koncentrujące się na integracji technologii ICT w rehabilitacji wspomaganej robotycznie stanowią ważny krok w kierunku wykorzystania nowoczesnych technologii do wsparcia procesu leczenia i poprawy komfortu życia pacjentów.

Praca doktorska pt. *Possibilities and efficacy of including ICT technologies in robot-aided distant home rehabilitation* wpisuje się w ten nurt badań, oferując kompleksowe spojrzenie na możliwości i skuteczność zastosowania nowoczesnych technologii w obszarze rehabilitacji zdalnej.

W Polsce można znaleźć znakomite przykłady prac naukowych oraz firm wdrażających roboty rehabilitacyjne. Z pewnością w awangardzie znajdują się Politechnika Warszawska i PIAP - Łukasiewicz.

Praca wykonana w ramach doktoratu wdrożeniowego dotyczy opracowania systemu sterowania wraz metodologią projektowania i walidacją przyjętych rozwiązań dla rehabilitacji odbywającej się na odległość.

Postawiony problem i jego realizacja

Praca powstała jako etap opracowania i przygotowania urządzenia do wdrożenia, w firmie posiadającej odpowiednie doświadczenie (PIAP), więc zwrócono szczególną uwagę na analizę wymagań funkcjonalnych i wymagań bezpieczeństwa (zgodnie z obowiązującymi normami). Wszystko to oznacza, że przekazana do recenzji praca spełnia wszystkie podstawowe założenia doktoratów wdrożeniowych, zarówno przez postać autora, zaangażowanego inżyniera w projektowanie i badania oryginalnego robota przygotowywanego do wdrożenia, firmy w której pracuje (PIAP), jak i osadzenie doktoratu w najodpowiedniejszym wydziale dla tego tematu Politechniki Warszawskiej oraz wybór promotorów tego dzieła.

Egzoszkielec został prototypowany przy użyciu, odpowiednio do celu, dwóch technologii druku 3D. Czyli autor posiada wiedzę z inżynierii materiałowej o nowoczesnych sposobach wykonywania prototypów. Skonstruowany egzoszkielec ramienia umożliwi pełną ruchomość

stawów barkowych i łokciowych. Testowany prototyp posiada trzy stopnie aktywne i 2 bierne. Nie ma czujników siły, pewnie z powodów ograniczonych środków finansowych projektu doktoranta, więc nie można było wykonać badań dla rehabilitacji aktywnej z robotem. Autor wykonał zatem testy robota dla rehabilitacji biernej korzystając z pomiarów za pomocą enkoderów umieszczonych w osiach egzozszkieletu i EMG. W ramach doktoratu prowadzona była terapia ze wspomaganiem ruchu według zadanej trajektorii. EMG – elektromiografia pozwala na rejestrowanie sygnałów elektrycznych generowanych przez mięśnie podczas ich aktywacji. Ocenimy: siłę i intensywność skurczów mięśni, koordynację między różnymi grupami mięśni, które można uznać za podstawę badania porównawczego efektu rehabilitacji wykonanego różnymi metodami. Do terapii zdalnej przygotowano cyfrowego bliźniaka.

W zdalnych procedurach ważną rolę odgrywa komunikacja, dlatego autor opracował kilka metod stosując wizualizacje (prosta grafika 2D) na monitorze lub 3D w goglach VR (wykorzystujących technologie wirtualnej rzeczywistości) lub też 3D na monitorze. W części opisanej jako A autor ocenił poziom „rozumiałości” interfejsów użytkownika. W części B przeprowadzono badanie na grupie 10 zdrowych ochotników. Porównywane były trzy parametry: średni poziom aktywacji grupy mięśniowej, średnia różnica bezwzględna pomiędzy aktywacjami grupy mięśniowej przy ręcznym wspieraniu ruchu i zrobotyzowanym wspieraniu ruchu oraz czas poprawnej aktywacji konkretnej grupy mięśniowej podczas ruchu (oceniane na podstawie kinematyki egzozszkieletu). Autor postawił dwie tezy: jedna nie została potwierdzona, ponieważ nie dowiedziono (A), że stosowanie technologii wirtualnej rzeczywistości w goglach poprawia zrozumienie opisu zadań przez pacjenta; druga, która dotyczyła stwierdzenia, że jakość wykonywanych ćwiczeń rehabilitacyjnych nie zmienia się, jeśli wyspecjalizowanego człowieka zastępuje opracowany robot – egzozszkielet ramienia - została potwierdzona w ramach wykonanych badań.

Treść

Praca ma nietypowy układ i rozmiar. Stron 310. Jest napisana w języku angielskim i pięknie wydana przez PIAP. Rozpoczynają ją dwujęzyczne dobrze napisane streszczenia.

Autor pisze, że „celem badania jest zbadanie wpływu terapii wspomaganego egzozszkieletem na układ mięśniowo-szkieletowy pacjentów w porównaniu z terapią konwencjonalną opartą na opracowanych algorytmach oceny opartych na EMG i możliwościach wykorzystania technologii VR do wizualizacji ćwiczeń. Badanie obejmuje analizę potrzeb i ograniczeń użytkowników, symulację ćwiczeń, projektowanie i prototypowanie egzozszkieletu drukowanego w technologii 3D, opracowanie algorytmu oceny opartego na EMG, stworzenie środowiska wizualizacji opartego na VR dla użytkownika systemu oraz eksperymenty z ochotnikami.” Zadanie jest bardzo ambitne.

System sterowania został zintegrowany z wizualizacją ćwiczeń opartą na fantomie VR i pasywnym egzozszkieletem do rejestrowania ruchów. Ponadto opracowano cyfrowego bliźniaka egzozszkieletu, aby umożliwić nadzór na odległość i zdalne monitorowanie leczenia.

Urządzenie przygotowano do biernej fizjoterapii z automatycznym śledzeniem zarejestrowanych trajektorii.

Potem autor zapoznaje nas ze stanem wiedzy i dostępnymi produktami o cechach podobnych do przedstawionych w doktoracie (*State of the art.* w objętości 13 stron). Należy zwrócić uwagę, że ten rozdział świadczy o profesjonalnym podejściu do zagadnienia, dociekliwości i o poważnych zamiarach w perspektywie wdrożenia swojego produktu. Przegląd zawiera aspekty naukowe i rynkowe. Szczegółowy opis projektu, pracy doktorskiej znajdziemy w kolejnym rozdziale *Project details* (str.27). W związku z dosyć rozbudowanymi i obszernymi rozdziałami pomyśl, by każdy kończyć podsumowaniem wydaje się uzasadniony i wygodny dla Czytelnika. Pełny opis projektu mechanicznego i elektronicznego robota znajdujemy w rozdziale 4 *Design of the system* (str. 350). W kolejnym rozdziale autor opisuje metodykę badań - *General methodology* (str. 32). Pełny opis projektu mechanicznego i elektronicznego robota znajdujemy w rozdziale 4 *Design of the system* (str. 35). Potem w rozdziale 5 *Technologie Informacyjno-Komunikacyjne - Implementation of selected ICTs* (str.55) opisano urządzenia i techniki pomiarowe. Uzyskane wyniki pomiarowe w rozdziale 6 poświęconym walidacji - *Validation of performance* (str. 62), a wnioski - *Conclusions* (str.87) - przedstawiono w rozdz. 6. Dalej w sposób już typowy dla tego typu dokumentów autor umieścił listę cytowanych publikacji (w liczbie 154) spis wykresów, ilustracji, tabel (46+14). Od strony 113 zaczynają się dodane publikacje (pełne teksty, kopie).

Warto zwrócić uwagę w tym miejscu na kilka spraw.

Na stronie 13 rozpoczyna się wartościowe wprowadzenie w formie analizy State of the Art. W Tabeli 1 autor podsumował „Considered tools for remote home treatment”. Zgodnie z intencją wdrożenia, autor nie tylko określa miejsce swojego projektu na tle istniejących możliwości i dostępnych produktów w obszarze telerehabilitacji, ale również porusza kwestie związane z potencjałem rynkowym.

Jak wskazuje, „globalny rynek urządzeń rehabilitacyjnych jest wyceniany na około 20 miliardów dolarów, z rocznym wzrostem (CAGR) na poziomie 5,9%-6,09%. Jest bardziej rozproszony niż skonsolidowany. (...) Rynek robotów przeznaczonych do fizjoterapii jest mniejszy, ale osiąga wartość przekraczającą 1,5 miliarda dolarów, przy znacznie wyższym CAGR wynoszącym 22,1%.”

Autor podsumowuje: „Na podstawie analizy obecnych trendów istnieje potrzeba opracowania systemów do użytku domowego oraz walidacji ich automatycznego działania. W kolejnej części przedstawiono technologie AR, VR, MR, XR, EMG, EEG, FES, AI, mHealth i telemedycynę jako wiodące ICTs wykorzystywane w kinezoterapii.” Następnie szczegółowo analizuje poszczególne techniki i technologie.

Jest to niezwykle profesjonalne wprowadzenie, świadczące o determinacji i pracowitości autora w zakresie tworzenia systemu spełniającego zarówno współczesne oczekiwania technologiczne, jak i rynkowe, o czym też świadczy liczba cytowanych prac (prawie 150).

Na stronie 27 rozpoczyna się sekcja poświęcona prezentacji podstaw tematu projektu. Autor motywuje swoje zainteresowanie tematem skalą potrzeb globalnych, podkreślając: „Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) informowała już w 2011 roku, że niemal 15% ludzi na świecie zmaga się z jakąś formą niepełnosprawności.” Autor zwraca także uwagę na doświadczenia pandemii COVID-19, która unaoczniała zalety telemedycyny.

Zdalne metody wspierania rehabilitacji, w tym zabiegów, wymagają odpowiedniego przygotowania — zarówno pod względem technologicznym, jak i organizacyjnym. Proponowane rozwiązanie zakłada instalację w domu pacjenta robota rehabilitacyjnego, odpowiednio oprogramowanego i połączonego sieciowo z centrum zarządzania oraz kontroli leczenia. W takim modelu zespoły fachowców, dostępne na odległość, mogą w sposób odpowiedzialny nadzorować proces leczenia i rehabilitacji w warunkach domowych.

Autor łączy szczegółowe analizy z wyraźną świadomością globalnych wyzwań, podkreślając znaczenie skalowalnych rozwiązań w zakresie domowej rehabilitacji wspomaganej robotami.

Nieco zagubione w tym obszernym tekście znajdujemy cel i tezy pracy (str.28)

W rozdziale 3 autor przedstawił plan pracy, ogólne metody oraz narzędzia wykorzystane w tej pracy dyplomowej. Nie mamy wątpliwości, że zaprezentowana praca badawcza jest owocem wieloletnich działań nad robotem – od etapu projektowego po fazę przedwdrożeniową.

Rozdział 4 (str. 35) jest poświęcony konstrukcji prototypu egzoszkieletu dla kończyn górnych, zaprojektowanego i zbudowanego na potrzeby procedury eksperymentalnej.

Projektowanie części mechanicznej (rozd. 4.4) zostało podsumowane w tabeli: „Tabela 3: Kinematyka stopni swobody (DOFs)” oraz na rysunku: „Rysunek 4: Wizualizacja zaprojektowanego egzoszkieletu z odwzorowaniem kończyny ludzkiej”. Kolejne rysunki pokazują szczegóły konstrukcji, elektronikę oraz system sterowania. Na rysunku 10 widzimy autora prezentującego model egzoszkieletu wykonanego opisanymi metodami szybkiego prototypowania 3D. W rozdziale 4.7 przedstawiono interfejs użytkownika, a następnie autor dokonał analizy, opierając się na literaturze naukowej (np. Aalborg University), jakie funkcje pacjent powinien odzyskać w wyniku rehabilitacji oraz jak zaplanować badania, by je osiągnąć (np. planowanie trajektorii ruchu). Rozdział 5 opisuje technologie ICT opracowane i przetestowane w ramach badania. Wyniki zaprezentowano w publikacji załączonej N (dla A czyli badań interfejsu, str. 283) oraz testów oceny mięśni podczas stosowania robota (dla B) w tabelach 13 i 14, wykresach i sygnałach EMG w rozdz. 6.

Wydrukowana praca ma pewnie szanse na duże zainteresowanie również ze względu na zamieszczenie pełnych publikacji (15 publikacji plus postery, patentów dowód i dyplomy, nagrody) bezpośrednio odnoszących się do przedstawionego dzieła. Jest też dokument opinii Komisji Etycznej na temat planowanych i prowadzonych potem badań. Mamy, więc pełny komplet informacji, które świadczą o profesjonalnym i zgodnym z kanonami nauki działaniu Doktoranta.

Analiza

„System umożliwia pełną mobilność stawów barkowego i łokciowego, natomiast napędza wyłącznie trzy stopnie swobody. Rotacje wewnętrzne / zewnętrzne pozostały wolne dzięki zastosowaniu pasywnych łożysk otwartych. System sterowania został zintegrowany z wizualizacją ćwiczeń opartą na modelach człowieka w VR oraz pasywnym egzoszkieletem rejestrującym ruchy.”

Analiza przedstawiona w doktoracie jest szczegółowa i bazuje na zaawansowanych parametrach biomechanicznych i aktywności mięśniowej, które umożliwiają precyzyjne porównanie efektywności rehabilitacji robotycznej i manualnej. Średnia aktywacja mięśni (e) mierzy przeciętny poziom aktywności mięśni w trakcie całej sesji rehabilitacyjnej, znormalizowany dla każdego uczestnika co pozwala ocenić, czy poziom zaangażowania mięśniowego podczas rehabilitacji robotycznej i manualnej jest porównywalny. To prosta miara pozwalająca określić ogólną intensywność pracy mięśni. Średnia różnica w aktywacji mięśni mierzy zmienność aktywności mięśniowej w trakcie sesji, co pozwala ocenić stabilność i kontrolę skurczów mięśni. Wskazuje, czy rehabilitacja robotyczna pozwala na bardziej precyzyjną kontrolę mięśni w porównaniu do rehabilitacji manualnej. Podkreśla różnice w zdolności pacjenta do utrzymania jednolitego poziomu aktywacji mięśniowej, co jest kluczowe w efektywnej rehabilitacji. Procent czasu prawidłowej aktywacji mięśniowej ($Tc\%$) to wskaźnik proporcji czasu, w którym aktywacja mięśni spełnia określone kryteria prawidłowości (np. odpowiedni poziom skurczu antagonistycznego i relaksacji agonistycznej oraz stabilne tempo skurczu). Uwzględnia czas i jakość prawidłowego ruchu, co czyni go szczególnie ważnym dla oceny skuteczności rehabilitacji. Bezpośrednio mierzy zdolność pacjenta do kontrolowania mięśni zgodnie z wymaganiami terapeutycznymi. Prędkość skurczu (pierwsza pochodna EMG) pozwala mierzyć tempo zmian napięcia mięśniowego, oceniać dynamikę ruchów i zdolności pacjenta do precyzyjnego sterowania aktywnością mięśniową.

Doktorant porównał skuteczność rehabilitacji manualnej z wykorzystaniem fizjoterapeuty oraz rehabilitacji wspomaganej przez robota, opierając się na dwóch głównych aspektach: interfejs użytkownika (sposób komunikacji z pacjentem) i wpływ na mięśnie (ocena biomechaniczna). Badanie przeprowadzono w dwóch etapach (procedury eksperymentalne A i B) na ochotnikach, a wyniki pozwoliły ocenić zarówno działanie systemu, jak i jego wpływ na pacjenta.

Eksperyment A (interfejs użytkownika): Badano, jak różne wizualizacje trajektorii ruchu (2D oraz 3D, w tym VR) wpływają na percepcję pacjentów. Testowano reakcje uczestników na rehabilitację z użyciem egzoszkieletu w trybie pomiarowym. Nie stwierdzono znaczących różnic w sposobie komunikacji z pacjentem między różnymi metodami wizualizacji. Wyniki są ważne dla przyszłego projektowania systemów rehabilitacyjnych, szczególnie pod kątem akceptacji technologii przez użytkowników.

Eksperyment B (wpływ na mięśnie): Zastosowano egzoszkielec w trybie rehabilitacji i porównano jego działanie z manualnym prowadzeniem kończyny przez fizjoterapeutę.

Badano aktywność ośmiu grup mięśniowych za pomocą EMG oraz zakresy ruchu (ROM). Analizowano kluczowe wskaźniki, takie jak średnia aktywacja mięśni (e), zmienność aktywacji (δe) oraz procent czasu prawidłowej aktywacji mięśniowej ($Tc\%$). W większości przypadków aktywacja mięśni podczas rehabilitacji robotycznej była porównywalna do manualnej. Zauważono jednak wyższe obciążenie mięśnia naramiennego z powodu wagi egzoszkieletu, co wpłynęło na wyniki w grupach mięśniowych odpowiadających za ruchy barku.

1. Różnice w aktywacji mięśni (Fig 40/41). Grupy mięśniowe 3-8: Różnice w aktywacji mięśni są relatywnie małe między fazą rejestracji ruchu (prowadzenie przez fizjoterapeutę) a fazą śledzenia trajektorii (prowadzenie przez egzoszkielec). Oznacza to, że egzoszkielec odtwarza ruchy w sposób wierny i spójny z manualnym prowadzeniem. Grupy mięśniowe 1-2: Różnice są wyraźne i znaczące – jak twierdzi autor. To są mięśnie o najwyższej średniej aktywacji, co może wynikać z obciążenia generowanego przez wagę egzoszkieletu, szczególnie na mięsień naramienny.
2. Wskaźnik $Tc\%$ (czas prawidłowej aktywacji mięśniowej) – Fig. 42. $Tc\%$ osiąga ponad 85% dla większości grup mięśniowych (3-8) w fazie śledzenia trajektorii. Grupy mięśniowe 1-2 mają niższe wartości $Tc\%$, co sugeruje problemy z prawidłową aktywacją mięśni. Przyczyna problemów w grupach 1-2: Nadmierne obciążenie generowane przez ciężar egzoszkieletu na stawie barkowym prowadzi do nieoczekiwanych aktywacji mięśnia naramiennego. Konieczne jest przeprojektowanie egzoszkieletu w celu zmniejszenia jego masy i zwiększenia sztywności.
3. Zakresy ruchu (ROM) - Tab. 13. ROM (Range of Motion) mierzono przed i po eksperymencie. Wyniki pokazują poprawę w zakresie ruchu, typową dla krótkich sesji rehabilitacyjnych wspomaganych przez człowieka.

Wyciągnięto wnioski: Rehabilitacja wspomagana robotycznie może być równie skuteczna jak manualna, o ile egzoszkielec nie wywiera dodatkowych obciążeń na stawy użytkownika. Zarówno w przypadku interfejsu użytkownika (eksperyment A), jak i wpływu na mięśnie (eksperyment B), system robotyczny wykazuje porównywalne efekty do terapii manualnej.

Dalsze prace powinny skupić się na optymalizacji konstrukcji egzoszkieletu, aby zmniejszyć obciążenie mięśni i poprawić komfort użytkownika.

Wyniki dowodzą, że system rehabilitacyjny wspomagany robotem ma potencjał, by stać się realną alternatywą dla konwencjonalnej terapii manualnej, szczególnie w kontekście automatyzacji i zwiększenia dostępności usług rehabilitacyjnych.

Uwagi krytyczne

Ograniczenie liczby uczestników do 10 osób zdrowych oraz zastosowanie jedynie podstawowej statystyki, takiej jak średnie pomiarowe, może być podstawą do krytyki w recenzji doktoratu. Badania na niewielkiej liczbie uczestników (10 osób) są niewystarczające, aby wyciągnąć uogólnione wnioski dotyczące skuteczności terapii robotycznej. Wybór wyłącznie zdrowych uczestników ogranicza reprezentatywność badania, szczególnie jeśli

celem jest opracowanie systemu rehabilitacyjnego dla osób z dysfunkcjami ruchowymi. Wyniki mogą być obarczone dużym błędem losowym i nie muszą odnosić się do rzeczywistej populacji pacjentów. Testowanie na osobach zdrowych ogranicza możliwość oceny rzeczywistej skuteczności systemu rehabilitacyjnego w warunkach, w których będzie stosowany (np. u osób z ograniczeniami ruchowymi, bólem, osłabionymi mięśniami). Zatem brak dowodów na skuteczność systemu w grupie docelowej (pacjenci) wiąże się z wymogiem ostrożności przy formułowaniu wniosków dotyczących użyteczności systemu w praktyce klinicznej.

Brak zaawansowanych metod statystycznych nie pozwala na dokładną analizę wyników, np. oceny wariancji, zależności pomiędzy parametrami czy istotności różnic między fazami eksperymentu. Bez testów statystycznych, takich jak analiza wariancji (ANOVA) czy t-testy, trudno ocenić, czy zaobserwowane różnice w parametrach (np. δe , T_c) są rzeczywiście istotne, czy wynikają z losowości.

Mała próba i zdrowi uczestnicy ograniczają możliwość uogólnienia wyników na rzeczywistą populację pacjentów. Prosta analiza statystyczna nie wykorzystuje pełnego potencjału danych, co może sugerować brak głębszego podejścia badawczego. Badanie na 10 osobach można uznać za pilotażowe, którego celem jest wstępna weryfikacja systemu i uzyskanie podstawowych danych do dalszych badań.

Ale jeśli celem doktoratu było bardziej skupienie się na technicznych aspektach projektowania systemu niż na pełnym wdrożeniu klinicznym, mała liczba uczestników może być uzasadniona. Warto jednak podkreślić znaczenie tej pracy jako fundamentu dla dalszych badań, a autor zdaje sobie sprawę z konieczności poprawy konstrukcji i uzupełnienia badań w procesie wdrożenia klinicznego robota. Czego życzę w przekonaniu, że autor wykazał należyty potencjał twórczy i badawczy.

Podsumowanie i opinia

Głównym wyzwaniem pracy doktorskiej jest udowodnienie, że zdalna kinezyterapia kończyn górnych pacjenta jest możliwa przy użyciu systemu wspomaganego robotem, wspieranego przez wybrane technologie ICT. Cel ten był realizowany poprzez zaprojektowanie i zbudowanie prototypu egzoszkieletu dedykowanego do takiej aplikacji i połączenie go ze śledzeniem EMG i środowiskiem VR. Te dwa elementy są połączone z systemem sterowania i interfejsem człowiek-maszyna i mają na celu automatyzację terapii, wizualizację komunikatów dotyczących zadań pacjenta. Czyli EMG jako efekt biofizyczny wykonywanych ćwiczeń, a zamiast rehabilitanta robot + wizualizacja wirtualna.

Zapisy EMG są bardzo wartościowe w ocenie aktywności mięśniowej i mogą stanowić solidną podstawę do analizy efektywności rehabilitacji robotycznej i manualnej. Jednak dla pełnej oceny równoważności metod należy je uzupełnić o dodatkowe parametry funkcjonalne, biomechaniczne i subiektywne, które uwzględniają pełen zakres celów rehabilitacji. Dzięki temu uzyskane wnioski będą bardziej kompleksowe i wiarygodne.

Podsumowując opracowane technologie zostały przetestowane w dwóch próbach. Pierwsza z nich obejmowała powtarzanie zarejestrowanych ruchów z różnymi typami wizualizacji - suwakami 2D, fantomami 3D i fantomami VR.

Zaobserwowano, że nie występują żadne – jak ocenił autor - istotne różnice w uzyskanej dokładności ruchu pomiędzy wizualizacją opartą na fantomie prezentowaną na płaskim ekranie a w zestawie okularów typu gogle VR. Następnie zorganizowano próby z egzoszkieletem. Porównano aktywność elektryczną grup mięśniowych uczestnika w symulowanych sesjach zorientowanych na zadania. Analiza udowodniła, że aktywacje mięśni pozostają na podobnym poziomie, a odpowiednie grupy są aktywowane zarówno w przypadku leczenia manualnego, jak i wspomaganego egzoszkieletem. Wyniki pracy dowodzą, że egzoszkielety mogą być używane do wykonywania kinezyterapii, angażując układ mięśniowy pacjenta. Autor zauważa, że prototyp miał pewne ograniczenia dotyczące wagi i braku sztywności ograniczającej część ruchów.

Wiemy, że aby udowodnić, że rehabilitacja z wykorzystaniem robota przynosi takie same (lub lepsze) rezultaty jak rehabilitacja manualna prowadzona przez terapeutę, należy przeprowadzić znacznie szersze, randomizowane badanie kontrolowane (RCT) zapewniające pełny, wieloparametryczny z punktu widzenia efektów medycznych zestaw pomiarowy i wystarczający czas rehabilitacji, aby można było zaobserwować istotne zmiany.

Trudno oczywiście wymagać, by autor pracy samodzielnie wykonał w ramach doktoratu pełną ocenę funkcjonalną rehabilitacji pacjentów, wszystkie pomiary biomechaniczne, zbadał parametry neurologiczne oraz następnie dokonał rzetelnego, statystycznego porównania wyników. To jest zadanie interdyscyplinarne i .. kosztowne.

Podsumowując recenzję, należy podkreślić, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi dzieło o wysokiej wartości naukowej i praktycznej. Autor, Pan mgr inż. Piotr Falkowski, wykazał się wszechstronną wiedzą teoretyczną i praktycznymi umiejętnościami w dziedzinie inżynierii biomedycznej, automatyki, elektroniki, co zaowocowało powstaniem innowacyjnego rozwiązania technologicznego. Opracowany przez autora system sterowania robota rehabilitacyjnego – egzoszkieletu ramienia - został zaprojektowany i zrealizowany z dużą precyzją oraz z uwzględnieniem potrzeb użytkowników – pacjentów oraz specjalistów z zakresu rehabilitacji.

Przedstawiona praca łączy w sobie wiedzę inżynierską oraz umiejętność wdrażania nowoczesnych technologii medycznych, włącznie z elementami gry rynkowej. Praca doktorska dowodzi, że rehabilitacja wspomagana robotem może być porównywalna pod względem skuteczności do terapii manualnej prowadzonej przez fizjoterapeutę. Kluczowym argumentem w pracy jest analiza aktywności mięśniowej (EMG), która wykazała, że stan mięśni oraz wzorce ich aktywacji podczas terapii robotycznej i manualnej są podobne.

Uwagi zawarte w recenzji mają charakter uzupełniający i nie zmniejszają wartości przedstawionych rezultatów. Osiągnięte cele oraz potencjał wdrożeniowy pracy w pełni

uzasadniają jej pozytywną ocenę. W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana Piotra Falkowskiego pt. „*Possibilities and efficacy of including ICT technologies in robot-aided distant home rehabilitation*” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. **Oceńm ją bardzo dobrze. Ze względu na jej walory zgłaszam ją do wyróżnienia.** Praca powinna zostać dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a jej autor zasługuje na nadanie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie „**automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**”.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski należy stwierdzić, że **rozprawa doktorska pt „*Possibilities and efficacy of including ICT technologies in robot-aided distant home rehabilitation*” spełnia wymogi pracy doktorskiej** opisane w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r- Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742, z późn. zm)). W związku z powyższym stwierdzeniem proszę o przyjęcie rozprawy Pana **Piotr Falkowski** i realizację dalszych etapów przewodu doktorskiego.

ADJUNKT BADAWCZO-DYDAKTYCZNY
Zakładu Biofizyki Katedry Biofizyki
Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach

Zbigniew Nawrat
dr hab. n. med. Zbigniew Nawrat