

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Falkowskiego na temat „Possibilities and Efficacy of Including ICT Technologies in Robot-Aided Distant Home Rehabilitation”

(Opinia niniejsza została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, zgodnie z Uchwałą Rady z dnia 17.09.2024)

1. Przedmiot rozprawy

Wsparcie procesu rehabilitacji poprzez zastosowanie nowoczesnych rozwiązań z obszaru robotyki oraz technologii informatycznych i komunikacyjnych jest aktualnym zagadnieniem naukowym, rozwijanym przez szereg zespołów pracujących w ośrodkach naukowych w różnych krajach. Biorąc pod uwagę jedynie tegoroczne publikacje zgromadzone w bibliotece cyfrowej IEEE Explore można znaleźć ponad 50 artykułów na ten temat. Z kolei w ofercie wystawców tegorocznych targów Medica w Dusseldorfie, w obszarze rehabilitacji ruchowej wyraźnie przeważały urządzenia w formie egzoszkieletoów do rehabilitacji kończyn dolnych oraz urządzenia w postaci ramion wodzących kończyny górne. Wyrażna była także tendencja rozwojowa telemedycyny, jednak nie w obszarze rehabilitacji. W tym kontekście prace doktoranta nad egzoszkieletem do rehabilitacji kończyny górnej oraz oprogramowaniem wspomagającym wyraźnie wypełniają lukę w tym obszarze i mogą dawać szansę na komercjalizację stworzonej technologii.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu terapii wspomagananej autorskim egzoszkieletem na układ mięśniowo-szkieletowy pacjentów w porównaniu z terapią konwencjonalną wykorzystując kryteria bazujące na pomiarach EMG. Praca porusza ponadto temat wykorzystania technologii VR do prezentacji ćwiczeń pacjentowi oraz przebiegu zabiegu terapeutycznego – w tym zakresie jest to podejście nowe.

Podsumowując te wstępne uwagi, stwierdzam że rozprawa mgra inż. Piotra Falkowskiego podejmuje bardzo ważną i trudną tematykę zastosowania technologii w medycynie. Rozważany problem z całą pewnością można uznać za aktualne zagadnienie naukowe w obszarze automatyki i robotyki, a zatem mieszczący się w dyscyplinie Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, do jego rozwiązania potrzebne były studia literaturowe, rozszerzenie znanych wcześniej wyników teoretycznych, samodzielne opracowanie innowacyjnych rozwiązań oraz wykonanie szeregu eksperymentów. Badania dotyczyły zarówno sprzętu, jak i algorytmów. Badania przeprowadzono zarówno w różnych środowiskach symulacyjnych, jak i na grupach wolontariuszy (za zgodą właściwej komisji etycznej).

2. Ocena zawartości rozprawy

Układ pracy jest logiczny i spójny. Podział treści jest właściwy i ściśle podporządkowany realizacji celu rozprawy, który został sformułowany następująco:

udowodnienie, że zdalna kinezyterapia kończyn górnych pacjenta może być wykonywana przez zrobotyzowany system wspierany wybranymi technologiami ICT.

Postawiony cel i wskazana droga realizacji są bardzo ambitne i wynikają z zaobserwowanych przez Autora i podjętych potrzeb badawczych, czyli tematów nierozwiązanych w aktualnej literaturze przedmiotu.

Praca została napisana po angielsku, jest podzielona na 6 zasadniczych rozdziałów i podsumowanie, zawiera także 19 załączników w postaci artykułów naukowych, projektów technicznych, skanów patentu i nagród oraz zgody komisji etycznej na prowadzenie badań z ludźmi. Literatura obejmująca 154 pozycje jest trafnie dobrana, i niemal wszystkie zestawione publikacje są cytowane w rozprawie. Należy odnotować, że mgr Falkowski jest autorem samodzielnym lub współautorem 13 przywołanych artykułów (w tym kilku z IF), większość przytacza w całości w załącznikach. Ponadto, w załączniku I umieszczono także artykuł niepublikowany (w formacie czasopisma JAMRIS).

W pierwszym rozdziale rozprawy Autor przedstawia ogólne spojrzenie na zagadnienie zrobotyzowanej rehabilitacji, w szczególności kończyn górnych, oraz jej możliwe zastosowania w różnych jednostkach chorobowych. Rozpoczyna od ogólnych pojęć fizjoterapii, przebiegu procesu doboru terapii, analizuje przypadki pacjentów neurologicznych (w tym po udarze), ortopedycznych i po wypadkach. Zwraca także uwagę na kwestie terapii w domu oraz opieki zdalnej. Autor dokonuje nie tylko właściwego przeglądu literatury światowej, ale także rynku robotów rehabilitacyjnych oraz urządzeń i technologii wspomagających – wskazuje obszary, gdzie badania naukowe i prace wdrożeniowe mogą być najbardziej efektywne w kontekście tematu i celu rozprawy. Prawidłowo identyfikuje główne problemy i potrzeby w odniesieniu do egzoszkieleatów: minimalizację wagi urządzenia (przy zachowaniu jego możliwości), zapewnienie bezpieczeństwa i eksperymentalne wykazanie wyższej wydajności systemów zrobotyzowanych.

Kolejny rozdział skupia się na motywacji (wynikającej z wcześniejszych analiz), celu i tezach rozprawy oraz obszarze badań. Trzy cele szczegółowe to: budowa lekkiego egzoszkieleatu do kinezyterapii zadaniowej kończyny górnej, użycie sygnałów EMG w układzie sterowania i technologii VR do wizualizacji procesu rehabilitacji oraz ocena wpływu tych technologii na sprawność biomechaniczną pacjentów. Autor sformułował także dwie tezy:

1. Egzoszkieleat, w sposób porównywalny do fizjoterapeuty, oddziałuje na układ mięśniowo-szkieletowy pacjenta;
2. Wykorzystanie wizualizacji ruchu VR/AR zapewnia lepszą dokładność śledzenia ścieżki ruchu przez pacjenta.

Obszar badań jest zgodny z ideą doktoratu wdrożeniowego i obejmuje cały proces projektowy: od analizy potrzeb i ograniczeń użytkowników, poprzez symulację kinematyki i dynamiki urządzenia i ćwiczeń, zaprojektowanie i wykonanie egzoszkieleatu w technologii druku 3D, aż po opracowanie odpowiednich algorytmów sterowania (z użyciem EMG) i wizualizacji (z

użyciem VR oraz eksperymenty z ochotnikami. Co więcej, proces projektowania poddano rygorowi właściwemu dla wyrobów medycznych, co podnosi przydatność rozprawy dla nauk inżyniersko-technicznych – przytoczone zostały odpowiednie normy i założenia techniczne.

Rozdział trzeci to określenie ram czasowych i technologicznych projektu. Badania zostały zaplanowane na 4 lata, w sposób typowy dla doktoratu wdrożeniowego, zaś metody badawcze i narzędzia dobrane adekwatnie do kolejnych etapów badań. Programy CAD, środowiska modelowania i symulacji oraz środowiska prototypowania robotycznego i VR – zostały szczegółowo opisane wraz z podaniem odpowiednich wersji w tabeli 2.

W rozdziale czwartym następuje prezentacja rozwiązania, zarówno koncepcji urządzenia (złożonego z komponentu mechanicznego i elektronicznego), jak i sposobu użycia systemu i algorytmów pracy. Na wstępie przeprowadzono badanie potrzeb potencjalnych użytkowników końcowych i klientów – objęło ono 138 polskich fizjoterapeutów oraz 60 pacjentów, którzy doświadczyli kinezyterapii dowolnej kończyny. Wyniki tego drugiego badania Autor określił jako niespójne (choć nie opisał ich w pracy), jednak wyniki pierwszego badania wskazały główne wyzwania dla rehabilitacji w Polsce. W dalszej części opisano konstrukcję mechaniczną egzoszkieletu w powiązaniu ze strukturą kończyny górnej. Zwrócono uwagę na parametryzację wymiarów ogniów, zakresy ruchów w poszczególnych złączach i sposób mocowania, aby zapewnić wsparcie dla jak największego grona pacjentów. Brakuje jednak analizy konstrukcji w kontekście planowanych ćwiczeń, np. ryzyka kolizji. Autor szczegółowo przedstawia model 3D konstrukcji, omawia poszczególne decyzje projektowe dotyczące złączy aktywnych i pasywnych, dobór napędów bazujący na modelowaniu dynamiki układu egzoszkieleć-ręka. Autor opracowuje oprogramowanie wspomagające ten proces, jednak na tym etapie używa go z niezbyt liczną bazą napędów, dopiero później (w artykule z załącznika G) pokazuje możliwość dalszego zmniejszenia masy egzoszkieletu. Dalej przedstawiono rozważania dotyczące technologii szybkiego prototypowania i doboru materiałów do druku 3D oraz analizy wytrzymałości przeprowadzone w odpowiednich programach symulacyjnych (Autodesk Inventor i Adams). O ile argument szybkości tworzenia prototypu oraz możliwości personalizacji konstrukcji z druku 3D jest przekonujący to jednak dość duże rozmiary urządzenia (widoczne na Fig. 10) każą się zastanowić, czy wszystkie planowane ruchy są nadal osiągalne oraz czy możliwe by było jakieś połączenie technologii addytywnych i elementów wzmacniających wytrzymałość konstrukcji a zmniejszających rozmiary. Projekt elektroniki układu sterowania wykorzystuje powszechne i sprawdzone platformy Raspberry Pi i Nucleo – jest przemyślany i przyjęty z pewnym zapasem właściwym dla konstrukcji prototypowych. Ciekawe jest natomiast jakie elementy struktury Autor rozważał lub musiał zastosować w związku z planowaną certyfikacją jako wyrób medyczny – tych informacji brakuje w rozprawie. W Sekcji 4.6 opisano działanie układu sterowania, z omówieniem równań kinematyki bazujących na notacji D-H. Pojawiają się także parametry regulatorów PID poszczególnych osi oraz propozycja zadania optymalizacyjnego minimalizującego rozbieżność pomiędzy zadaną trajektorią dłoni a realizowaną przez pacjenta (z jego deficytami ruchu lub kompensacjami). Temat optymalizacji jest przedstawiony w artykule umieszczonym w załączniku C, jednak nie zawiera on żadnych wyników badań. Obraz systemu dopełniają interfejs HMI i zestaw ćwiczeń funkcjonalnych. Co warte podkreślenia zestaw ćwiczeń został opracowany na podstawie wywiadów z potencjalnymi użytkownikami podczas prac w

Uniwersytecie w Aalborgu – nasuwa się jednak pytanie na ile uniwersalne są schematy pracy terapeutów w różnych krajach, a szczególnie ich zrozumienie dla rehabilitacji wspomaganego robotem (egzoszkieletem).

Rozdział 5 przedstawia realizację kolejnego celu szczegółowego, czyli aplikacji technologii ICT do wspomaganie terapii i w szczególności obejmuje: użycie sztucznej sieci neuronowej do predykcji dynamiki układu oraz modelu dynamiki do predykcji intencji użytkownika, zastosowanie pomiaru sygnałów EMG do obserwacji postępów rehabilitacji, zastosowanie różnych interfejsów graficznych, w tym wirtualnej rzeczywistości VR do wizualizacji oraz stworzenie cyfrowego bliźniaka egzoszkieletu do monitorowania terapii. Badania sieci neuronowych zostały przeprowadzone na danych symulacyjnych i zaprezentowane w samodzielnym artykule przytoczonym w załączniku D. Autor pokazał możliwość zastosowania sieci typu NARX do modelowania dynamiki egzoszkieletu razem z nieznanymi parametrami bezwładnościowymi kończyny górnej. Wyniki pokazują bardzo dobre możliwości predykcji dla napędzanych stopni swobody i nieco gorsze dla pasywnych. Proszę jednak o wyjaśnienie jakiego typu próba musi zostać wykonana na rzeczywistym egzoszkielecie, aby nauczyć sieć neuronową i czy taka próba może być bezpiecznie wykonana przez pacjenta? Do określenia intencji użytkownika, bez stosowania dodatkowych czujników siły, momentu lub nacisku, Autor proponuje porównanie symulowanego i rzeczywistego ruchu egzoszkieletu. Badania prowadzi jedynie na danych symulacyjnych zakładając różne niedokładności modelu i zakłócenia oraz prezentuje wyniki we wspólnym artykule przytoczonym w załączniku L. Proces tworzenia cyfrowego bliźniaka dla badanego systemu przedstawiono w artykule z załącznika H – to ciekawa koncepcja wykorzystująca kilka współczesnych narzędzi modelowania i symulacji oraz framework robotyczny ROS, istotnie rozszerzająca możliwości monitorowania przebiegu terapii z egzoszkieletem, wymagająca jednak dalszych badań.

Zasadnicze eksperymenty projektu przedstawiono w rozdziale 6, składają się z dwóch części ściśle powiązanych z tezami rozprawy. Autor rozpoczyna od szczegółowego opisu stanowiska badawczego i procedur testowych. Większość komponentów została już wcześniej przedstawiona, nowym jest pasywny egzoszkielet o strukturze identycznej jak egzoszkielet z napędami. Kampania testowa A, badająca wpływ metod wizualizacji na dokładność ruchu pacjenta, została szczegółowo opisana w artykule pokazanym w załączniku N, natomiast kampania testowa B, badająca wpływ terapii z egzoszkieletem na aktywność elektryczną mięśni w porównaniu z terapią konwencjonalną, została opisana w dalszym ciągu rozdziału. W badaniach wg schematu A wzięło udział pięć zdrowych osób (4M i 1K) w wieku 22-29 lat, które realizowały ruch kończyny górnej angażujący stawy barkowy i łokciowy. Ruch był rejestrowany za pomocą pasywnego egzoszkieletu (o 5 stopniach swobody), zaś zadawanie odbywało się na 3 sposoby wyświetlane w interfejsie graficznym stworzonym w środowisku Unity (jedna z metod wymagała gogli VR). Autor zaproponował kilka miar ilościowych oraz jakościową informację zwrotną do oceny użyteczności interfejsów. Eksperymenty można uznać za wstępną analizę problemu, zaś wyniki dały pewien pogląd w kwestii Tezy 2 rozprawy. Niestety dane pokazane w tabeli II (załącznik N) wydają się błędne (niepokojąco podobne dla wszystkich prób) i nie pozwalają na pełną ocenę przez recenzenta. Nie jest także zrozumiałe jaki rodzaj ruchu wykonuje osoba, jak został wygenerowany i czy został zatwierdzony przez terapeuta. W eksperymencie wg schematu B wzięło udział 10 zdrowych osób (8M i 2K), te

same ćwiczenia, z grupy aktywności codziennych, były wykonywane przez fizjoterapeutę oraz aktywny egzoszkielec. Przy czym ruchy egzoszkielec były odtworzeniem tych zapisanych podczas ćwiczenia wykonywanego przez fizjoterapeutę, zaś samo urządzenie było zamontowane na odpowiednim statywie. Autor zaproponował trzy miary ilościowe, dość jasno określone, przy czym dla parametru długość poprawnej aktywacji (wzór 9) Autor stosuje pewne warunki bez wyjaśnienia skąd one się biorą – wykresy fig. 26-31 są dość zagmatwane i nie wyjaśniają znaczenia tych warunków. Jednak generalnie wnioski wynikające z eksperymentów są spójne z przedstawionymi danymi i potwierdzają Tezę 1 rozprawy. Podczas eksperymentów mierzona była także jakość sterowania określona kolejnymi wskaźnikami ilościowymi pokazującymi błędy śledzenia trajektorii złączowych. Dla złączy 1 i 2 wyniki są satysfakcjonujące, zaś dla złącza 4 złe wyniki okazały się skutkiem problemu technicznego i jak zidentyfikował Autor błędu konstrukcyjnego. Ocena jakościowa zebrana w postaci ankiety pokazała jeszcze inne mankamenty konstrukcji i strategii sterowania. To pozwala na dalsze usprawnienia, co oczywiście jest wpisane w cykl projektowy i jest bardzo ważnym wynikiem eksperymentów. Część ze wskazanych problemów można było zapewne uniknąć na etapie modelowania 3D systemu – warto aby Autor odniósł się do tej uwagi.

Praca jest zakończona dość obszernym podsumowaniem odnoszącym się do tez rozprawy i celów oraz wskazującym dalsze kierunki badań i drogi komercjalizacji.

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy uważam:

- Zaprojektowanie i zbudowanie lekkiego egzoszkielec do rehabilitacji kończyny górnej z wykorzystaniem podejścia partycypacyjnego (na etapie projektowania), narzędzi optymalizacji konstrukcji (na etapie modelowania) i różnych metod druku 3D (na etapie prototypowania),
- Zaproponowanie serii eksperymentów i miar ilościowych pozwalających na weryfikację jakości sterowania egzoszkielec i efektywności oddziaływania na grupy mięśniowe w sposób porównywalny do fizjoterapeuty,
- Przygotowanie i wstępne zbadanie szeregu komponentów dla całego systemu rehabilitacji zdalnej, w tym: narzędzia prezentacji ćwiczenia, algorytmów predykcji dynamiki egzoszkielec i pacjenta, cyfrowego bliźniaka, układów elektronicznych i modułów programowych.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Str. 25, w. 3 od dołu – jak w kontekście tego wniosku, zwłaszcza oczekiwanej prostoty rozwiązania, Autor widzi swój prototyp?
2. Str. 26, w. 1 od góry – jakie konkretnie postulaty widzi Autor w odniesieniu do przepisów i wytycznych dotyczących telemedycyny?
3. Table 5 – czy zaproponowane napędy spełniały zadeklarowane parametry masy i momentu?
4. Str. 56, w. 4 od góry – zakres sugeruje liczbę całkowitą a nie float.

5. Str. 68, w. 1 od dołu – zapewne: upper extremity movement.
6. Str. 80, w. 7 od góry – dlaczego masa egzoszkieletu ma wpływ skoro urządzenie jest mocowane na statywie?
7. Str. 80, w. 8 od góry – dlaczego poziom 85% dla parametru $T_c\%$ jest satysfakcjonujący?
8. Str. 88, w. 13 od dołu – joint motor torque.
9. Załącznik D – w zdaniu: To have an applicable value, the test sets are built to represent a short-time calibration, while the test set reflects a long usage within continuous therapy series – zapewne pierwszy zbiór danych to zbiór treningowy, a drugi to testowy.
10. Załącznik N, Table II – wyniki dla wierszy 3-6 są identyczne chociaż w tekście jest mowa o różnicach.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Wymienione uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i edycyjny, i nie umniejszają podstawowych zalet naukowych rozprawy, które wymieniłem w pkt. 2. Z pełnym przekonaniem uważam, że mgr inż. Piotr Falkowski wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną i wysokimi umiejętnościami prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. W mojej ocenie, zawartość merytoryczna przedstawionej rozprawy spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania stawiane przez art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Grzegorz Granosik