

Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej

00-661 Warszawa, ul. Koszykowa 75

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Norberta Kapińskiego pt. „Proces gojenia ścięgna Achillesa oceniany przez fuzję danych z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych”

promotor rozprawy: dr hab. inż. Antoni Grzanka, Warszawski Uniwersytet Medyczny

promotor pomocniczy: dr Jakub Zieliński

zlecona pismem nr SRN/003/154/2020 z dnia 12 października 2020 r. przez Przewodniczącą Rady Naukowej IBIB PAN prof. dr hab. Jacka Waniewskiego.

Recenzując rozprawę doktorską mgr inż. Norberta Kapińskiego na wstępie zaznaczam, iż poniższa recenzja dotyczy jej poprawionej wersji po wcześniejszym wniosku jednego z recenzentów o skierowania do poprawy. W mojej recenzji w ograniczonym stopniu odnoszę się do poczynionych przez Autora rozprawy zmian chcąc zapewnić obiektywność oceny oraz adekwatność uwag merytorycznych do jej aktualnej treści.

Tematyką recenzowanej rozprawy doktorskiej jest automatyzacja oceny procesu gojenia ścięgna Achillesa w oparciu o metody obrazowania medycznego z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Materiał badawczy pochodzi od pacjentów, u których zerwanie ścięgna nastąpiło najczęściej w trakcie uprawiania sportu. Danymi badawczymi były rejestracje różnych modalności (tomografii rezonansu magnetycznego, ultrasonografii oraz badań biomechanicznych) wykonane przed operacją oraz w 9 terminach kontrolnych procesu gojenia. W części badań uzupełniającą grupę kontrolną stanowiło 29 zdrowych ochotników. Zebranie tak szczegółowych danych było możliwe w ramach realizacji projektu START pt. „Wykorzystanie autologicznych mezenchymalnych komórek macierzystych w procesie regeneracji rekonstruowanego ścięgna Achillesa” finansowanego z konkursu STRATEGMED1 przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Autorskie badania przedstawione w rozprawie oparte były na szeregu narzędzi z zakresu przetwarzania oraz eksploracji danych. Były to zarówno metody klasyczne, czego przykładem może być analiza składowych głównych (PCA), spełniające rolę przetwarzania wstępnego danych, jak również aktualne osiągnięcia w zakresie sztucznej inteligencji w postaci konwolucyjnych sieci neuronowych. Zaproponowane metody ich połączenia zależą od przyjętych zadań stawianych systemowi diagnostycznemu. Wyróżnić tutaj można problemy binarne, jakim było różnicowanie ścięgna zdrowego oraz po zerwaniu, oceny stanu gojenia ścięgna w przyjętej skali półilościowej, jak również oceny zbiorczej ukierunkowanej na łatwiejszą interpretację przez lekarza.

Zaproponowane w rozprawie rozwiązania mają na celu weryfikację przyjętej we wstępie hipotezy zakładającej możliwość opracowania automatycznej metody oceny gojenia się ścięgna

Achillesa bazującej na fuzji danych z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych. Autor rozprawy wymienia również cztery cele poboczne:

1. Wybór efektywnego kosztowo i czasowo protokołu badania bazującego na technikach obrazowania medycznego, a dokładniej Rezonansu Magnetycznego.
2. Przetestowanie różnego rodzaju podejść związanych ze szkoleniem głębokich sieci neuronowych.
3. Porównanie wyników oceny nowej metody z wynikami klasyfikacji bazującej na danych z ultrasonografii.
4. Porównanie wyników oceny nowej metody z oceną funkcjonalną, rutynowo stosowaną do wspomagania rehabilitacji po urazie ścięgna.

Przeprowadzone badania są spójne pod względem przyjętych celów i mogą prowadzić do opracowania użytecznych rozwiązań wspomagających diagnostykę medyczną.

Charakterystyka zawartości pracy:

Recenzowana rozprawa składa się z 8 rozdziałów, 2 dodatków przedstawiających interfejs oprogramowania oraz cech teksturalnych Haralicka, licząc 155 stron. Bibliografia zawiera 150 pozycji literaturowych oraz bazodanowych. Na wstępie rozprawy zamieszczony jest spis rysunków oraz tabel, natomiast na końcu wykaz skrótów i oznaczeń stosowanych w tekście.

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera krótki zarys współczesnej radiologii w aspekcie obrazowania medycznego, zastosowań metod sztucznej inteligencji w kierunku uzupełniania niedoborów wysoko wykwalifikowanego personelu medycznego oraz obserwowanego dynamicznego rozwoju głębokich sieci neuronowych.

Drugi rozdział definiuje przyjęte cele badawcze oraz strukturę pracy. Wymienione są w nim cel główny, cztery cele poboczne oraz opis zawartości pozostałych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

Rozdział trzeci omawia zagadnienia budowy anatomicznej i monitorowania procesu gojenia się ścięgna Achillesa. Kolejno przedstawione są w nim aspekty anatomiczne, biomechaniczne, czynniki sprzyjające urazom, problematyka leczenia oraz metody obrazowania i rejestracji parametrów biomechanicznych.

W rozdziale czwartym przedstawione zostały podstawy działania i przegląd konwolucyjnych sieci neuronowych aktualnie najczęściej stosowanych w zaawansowanych problemach sztucznej inteligencji. Przywołano tutaj zarówno porównania „konkursowe” rozwiązań ostatnich kilku lat, jak również wybrane wyniki skuteczności działania wybranych sieci zaczerpnięte z literatury. Autor definiuje w tym rozdziale stosowane w pracy miary błędów.

Należy w tym miejscu zaznaczyć, iż strony 7-68 rozprawy przedstawiają wiedzę encyklopedyczną i literaturową, tym samym nie zawierając wkładu Autora rozprawy w rozwój dyscypliny naukowej.

Rozdział piąty rozpoczyna prezentację rozwiązań autorskich i wyników badań. Przedstawiona jest w nim złożona metoda oceny procesu gojenia się ścięgna Achillesa, określony zbiór danych badawczych, metody oceny eksperckiej jako referencyjnej oraz wyniki analiz szczegółowych. Badaniom podlegają

różne rozwiązania w problemach różnicowania ścięgna zdrowego i po zerwaniu, oceny użyteczności diagnostycznej wybranych sekwencji RM, selekcji cech, modelowaniu procesu gojenia oraz oceny holistycznej stanu ścięgna Achillesa.

W rozdziale szóstym porównano zaproponowaną metodę z dwiema metodami: pierwszą opartą o paradygmat end-to-end, bazującą na badaniu USG oraz drugą wykorzystującą badania biomechaniczne.

Ostatnie dwa rozdziały zawierają wnioski Autora rozprawy podjęte w wyniku przeprowadzonych badań oraz podsumowanie pracy.

Ocena rozprawy doktorskiej z uwzględnieniem wytycznych Rady Naukowej IBIB PAN:

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy problematyki analizy skutków zerwania ścięgna Achillesa w oparciu o obrazowanie medyczne. Głównym celem pracy było stworzenie oprogramowania umożliwiającego zarówno rozpoznanie zerwania ścięgna Achillesa, jak również monitorowania procesu gojenia się ścięgna, w oparciu o obrazowanie rezonansu magnetycznego. Zaproponowane modele oparte są na głębokich sieciach neuronowych oraz metodach analizy i dyskryminacji danych. Autor pracy jednoznacznie formułuje oraz realizuje w zakresie przyjętych narzędzi szczegółowe cele badawcze osiągając w niektórych zagadnieniach wiarygodne i dokładne rezultaty. Charakter rozprawy należy określić jako aplikacyjny, a wkład autora mieści się w zakresie eksploracji danych.

Na bibliografię rozprawy doktorskiej składa się aż 150 pozycji z zakresu medycyny, sztucznej inteligencji, obrazowania medycznego oraz oprogramowania. Autor powołuje się na nie prawie wyłącznie w rozdziałach 2-4 na etapie przedstawienia użytych narzędzi badawczych i stanu wiedzy. Odniesienia do publikacji, w tym w postaci powołań na wyniki, uzasadniają wybór metod i narzędzi badawczych. Równocześnie widoczny jest brak odniesień literaturowych w dwóch ostatnich rozdziałach rozprawy.

Z punktu widzenia uzyskanych i zaprezentowanych w tekście analiz porównawczych ich poziom jest istotnie zmienny, a czasami wręcz wątpliwy pod względem poprawności przyjętych założeń. Recenzent wysoko ocenia analizy przydatności poszczególnych modalności RM do automatycznego diagnozowania stanu ścięgna Achillesa. Zostały one przeprowadzane zarówno pod względem różnicowania pomiędzy stopą zdrową i po urazie, jak również wskaźników zmian w czasie podczas rehabilitacji. Mają one istotne znaczenie zarówno zdrowotne (mniejsza ekspozycja pacjenta na działanie pola magnetycznego), praktyczne (możliwość ograniczenia czasu badania), jak również ekonomiczne. Wątpliwości budzi dobór danych testowych mający wpływ na powtarzalność i wiarygodność niektórych wyników oraz ograniczona dokładność predykcji wybranych wskaźników. Wyczerpujące odniesienie do tej kwestii będzie w dalszej części recenzji.

Jako oryginalny dorobek Autora rozprawy i główny wkład w rozwój dyscypliny naukowej wymienić można:

- opracowanie metody automatycznej oceny stanu oraz procesu gojenia się ścięgna Achillesa w oparciu o obrazowanie medyczne,

- połączenia w modelu sieci konwolucyjnych wraz z klasycznymi metodami analizy obrazów, dyskryminacji danych i wnioskowania,
- uzyskaniu wysoce skutecznego narzędzia do wykrywania zerwania ścięgna Achillesa,
- przeprowadzenia szeregu badań nad użytecznością różnych metod (podtypów) obrazowania dla określonego celu,
- porównanie metody opartej na RM z innymi metodami diagnostycznymi,
- opracowanie miary zbiorczej stanu procesu gojenia ścięgna.

Należy stwierdzić, iż niektóre wyniki badań są na wysokim poziomie i mogą być uznane za podstawę do badań klinicznych opracowanego systemu komputerowego. Są one również poparte publikacją w czasopiśmie *Acta of Bioengineering and Biomechanics* (100 pkt. wg. MNiSW) z 2019 roku, której pierwszym autorem jest mgr inż. Norbert Kapiński. W efekcie rozprawa doktorska stanowi istotny wkład w praktyczne zastosowania techniki w medycynie, a zarazem jej zakres najbardziej odpowiada dyscyplinie Inżynieria Biomedyczna. Przedstawione wyniki badań oraz ich interpretacja jest w znacznej mierze poprawna.

Uwagi merytoryczne do tekstu rozprawy:

W procesie oceny rozprawy pojawiły się pewne wątpliwości co do poprawności niektórych analiz, zastosowanych metod oraz prezentacji wyników. Poniżej zamieszczam uwagi ogólne do rozprawy doktorskiej.

1. Najbardziej krytyczna uwaga dotyczy zastosowanego podziału danych, w szczególności przyjmując tylko CZTERECH pacjentów jako zbiór testowy. Należy zauważyć, iż użycie 10 rejestracji w zdefiniowanych przedziałach czasowych nie zmienia tego faktu. Takie postępowanie powoduje, iż wiarygodność uzyskanych wyników badań dla takiego podziału danych jest minimalna. Trudno sobie wyobrazić, iż lekarz, a równocześnie pacjent, zgodziliby się na ocenę stanu zdrowia systemem, który był sprawdzony na tylko czterech innych osobach. Przyjęty podział danych (90% uczące i weryfikujące, 10% testujące) znacząco odbiega od standardów, gdzie dla przykładu można podać domyślny podział odpowiednio 75% i 25% w programie Statistica. W efekcie ograniczyło to również możliwość przeprowadzenia bardziej szczegółowych analiz.
2. Stwierdzam braki w analizie i przedstawieniu danych. Brakuje charakterystyk statystycznych pacjentów, w tym rozkładów ich cech somatycznych w grupach, oraz analizy statystycznej niezależności wystąpienia zerwania ścięgna Achillesa. Tego typu parametry są kluczowe w prowadzonych badaniach, a zostały całkowicie pominięte.
3. Z tekstu rozprawy wynika, iż jej Autor nie zadał sobie trudu sprawdzenia zgodności rozdzielczości obrazowania RM w eksplorowanych danych. Jest możliwe, iż poszczególne badania różnią się rozmiarami wokseli, w szczególności w krytycznych wymiarach poprzecznych do osi kończyny.
4. Niektóre analizy przedstawione są wrywkowo. Przykładowo w tabeli 5.3 (s.86) porównano tylko cztery wybrane sekwencje RM uzasadniając to analizą wizualną. Nie można takiego postępowania określić jako profesjonalne, a równocześnie dziwi niechęć Autora do przedstawienia porównania wszystkich modalności.

5. W pracy brakuje przedstawienia metodyki wykonanych analiz statystycznych. Nie wiadomo, czy była przeprowadzona weryfikacja hipotez oraz założeń stosowania poszczególnych testów. Brakuje zebrania i porównań estymacji wskaźników oceny procesu gojenia za pomocą testów statystycznych oraz ich oceny w czasie (próby zależne). W efekcie często autor przeprowadza wnioskowanie na podstawie wykresów lub pojedynczych miar.
6. W analizie PCA opisanej na stronie 80 brakuje wykresu zmienności udziału wyjaśnionej wariancji w funkcji liczby wykorzystanych cech. Przedstawione wartości są wrywkowe oraz brakuje zastosowania np.: metod statystycznych do określenia wartości progowej wyboru liczby cech. Równocześnie na niektórych etapach badań dokonywany jest arbitralny wybór liczby cech (np. strona 87) bez przeprowadzenia analizy wpływu.
7. Prawdopodobnie w powiązaniu z uwagą 1 są obserwowane błędy oceny parametrów przedstawione w punkcie 5.3.2 (strona 99 i następne). Dla niektórych parametrów widać istotne różnice pomiędzy oceną eksperta radiologa oraz systemu. Na tym etapie można stwierdzić, iż brakuje w badaniach przeprowadzenia oceny przez kilku ekspertów niezależnie i uśrednienia wyników.
8. Łączenie danych zbieranych w różnych odstępach czasu, jak ma to miejsce w badaniu opisanym w podrozdziale 6.2, jest wątpliwe. Czy ostatnie badania pacjentów po zerwaniu ścięgna Achillesa nie mogły przedstawiać już całkowicie wyleczonych przypadków?

W opinii recenzenta należy oczekiwać zaprezentowania wyników uzupełniających, szczególnie w zakresie uwag 1-4, w trakcie publicznej obrony doktoratu. Powinny one uwzględniać do najmniej 25% udział zbioru testującego w posiadanych danych badawczych.

Do uwag natury edytorskiej zaliczam:

9. W niektórych akapitach można odnieść wrażenie, iż Autor rozprawy ma problemy z budową zdań złożonych. Błędy stylistyczne można znaleźć przykładowo na stronach 21, 24, 49, 70. Przykładem niech będą zdania: „Do obliczenia współczynników regresji zastosowano zbiór pacjentów treningowych. Natomiast w celach porównawczych, zestawiono wyniki dla pacjentów testowych.”; oraz „ Druga z wymienionych sekwencji – o bardzo krótkich – nawet rzędu kilku ms.”.
10. Ze względu na ograniczoną czytelność rys. 3.6 wskazane byłoby oznaczenie obszaru zainteresowania na każdym z obrazów RM.
11. Wzór na stronie 27 zawiera błędnie dwukrotne mnożenie przez 2 oraz posiada niezgodnione jednostki. Zadziwiające jest to, że Autor upiera się, iż przedstawione obliczenia są prawidłowe. Zgodnie z tym wzorem $2*2*0.15/1500*400=0.08$, co jest nieprawdą.
12. Rysunek 4.5 zawiera niekompletne podpisy osi (drugi wykres od góry) oraz wartości (0 zamiast 100 w ostatnim wykresie).
13. Ocena holistyczna mogłaby zostać przedstawiona bardziej szczegółowo w postaci np. rozkładów różnic dla wszystkich pacjentów.

Na zakończenie należy zaznaczyć, iż Autor rozprawy poprawił i uzupełnił wybrane części pracy, co do których otrzymał uwagi recenzentów. Poprawki te niestety nie wyczerpują otrzymanych uprzednio uwag zarówno merytorycznych, jak i edytorskich. Pomimo tego podtrzymuję swoją pozytywną opinię

o pracy. Niniejszym stwierdzam, iż recenzowana rozprawa doktorska Pana mgra inż. Norberta Kapińskiego pt. „Proces gojenia ścięgna Achillesa oceniany przez fuzję danych z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych” w dyscyplinie Inżynieria Biomedyczna spełnia wymagania wynikające z art. 179 ust.2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1669) w związku art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora, i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.

Z poważaniem



Tomasz Markiewicz