

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

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy modelowania efektów leczenia ścięgna Achillesa po jego zerwaniu najczęściej w trakcie uprawiania sportu. Danymi badawczymi były obrazowania różnych modalności zarejestrowane przed operacją oraz w 9 terminach kontrolnych procesu gojenia. W części badań uzupełniającą grupę kontrolną stanowiło 29 zdrowych ochotników. Zebranie tak obszernych i wymagających pod względem technik rejestracji oraz ich terminowości danych było możliwe w efekcie 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.

W oparciu o posiadane rejestracje rezonansu magnetycznego (RM), ultrasonograficzne (USG) oraz biomechaniczne prowadzone badania skupiały się na opracowaniu nowych metod różnicowania ścięgna zdrowego i chorego oraz oceny procesu gojenia ścięgna Achillesa przy wykorzystaniu narzędzi eksploracji danych oraz konwolucyjnych sieci neuronowych. Badania mają wielotorowy charakter, podejmując zarówno analizę porównawczą skuteczności różnych sieci neuronowych oraz wykorzystanych metod obrazowych, jak też parametrów określających stopień odstępstwa od stanu normalnego ścięgna Achillesa wraz z tkankami otaczającymi. Wymienione treści mają na celu weryfikację założonej w rozprawie doktorskiej 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.

Przedstawione w rozprawie rozwiązania oraz analizy uzyskanych wyników, w tym porównawcze pod względem wykorzystanych metod obrazowania oraz wnioskowania, składają się na spójny kierunek badań naukowych w ramach wymienionych celów.

Charakterystyka zawartości pracy:

Recenzowana rozprawa składa się z 7 rozdziałów, 1 dodatku przedstawiającego interfejs oprogramowania i liczy 135 stron. Bibliografia zawiera 153 pozycje literaturowe oraz bazodanowe. Na wstępie zamieszczony jest spis rysunków oraz tabel, natomiast brakuje wykazu skrótów 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. Wymienione są w nim cel główny, cztery cele poboczne oraz krótka charakterystyka pozostałych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

Rozdział trzeci wprowadza czytelnika w zagadnienia monitorowania procesu gojenia ścięgna Achillesa. Po, z jednej strony szczegółowym, ale też niezbędnym przedstawieniu aspektów anatomicznych, jest wtrącenie dotyczące biomechaniki, a następnie przedstawienie danych statystycznych występowania urazów ścięgna Achillesa. Autor kolejno w oparciu o literaturę medyczną przywołuje definicje poszczególnych faz gojenia, sposobów leczenia oraz rehabilitacji. Po tej części medycznej przechodzi do podstaw fizycznych obrazowania metodami rezonansu magnetycznego (w tym jego podtypów), ultrasonografii, kończąc na badaniach biomechanicznych.

W rozdziale czwartym przedstawione zostały podstawy działania i przegląd najpopularniejszych konwolucyjnych sieci neuronowych. Przywołano tutaj zarówno porównania „konkursowe” rozwiązań ostatnich kilku lat, jak też wyniki skuteczności działania wybranych sieci zaczerpnięte z literatury.

Rozdział piąty rozpoczyna prezentację badań własnych autora rozprawy. Przedstawiona jest autorska 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 oraz modelowaniu procesu gojenia.

W rozdziale szóstym zawarto porównania zaproponowanego rozwiązania między innymi z metodami opartą na danych z USG oraz na badaniach biomechanicznych. Rozdział ten zawiera również analizę statystyczną wybranych wyników.

Ostatni rozdział rozprawy podsumowuje uzyskane wyniki w kontekście przyjętych w rozprawie celów oraz wskazuje na potencjalne dalsze kierunki badań.

Ocena rozprawy doktorskiej z uwzględnieniem wytycznych Rady Naukowej IBIB PAN:

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zastosowania zaawansowanych metod komputerowych automatycznej analizy skutków zerwania ścięgna Achillesa w oparciu o obrazowanie medyczne. Głównym celem pracy było stworzenie modelu opartego na głębokich sieciach neuronowych oraz metodach analizy i dyskryminacji danych z wysoką skutecznością estymującego wskaźniki oceny zaistnienia i procesu gojenia się ścięgna. Autor pracy jednoznacznie formułuje oraz realizuje w zakresie przyjętych narzędzi szczegółowe cele badawcze osiągając znaczące wyniki. Badani prowadzone są na wielu płaszczyznach analizy danych, a stosowane narzędzia są najbardziej aktualne (konwolucyjne sieci neuronowe) lub typu „state-of-the-art.” Charakter rozprawy należy określić jako aplikacyjny.

Rozprawa doktorska na różnych etapach wykorzystuje dane pochodzące z bardzo szerokiej i dokładnej analizy danych literatury światowej. Na bibliografię składa się aż 153 pozycji z zakresu medycyny, sztucznej inteligencji, obrazowania medycznego oraz oprogramowania. Przytoczony przegląd literatury dowodzi bardzo rzetelnego podejścia do problemu badawczego. Odniesienia do publikacji, w tym w postaci powołań na wyniki, uzasadniają wybór metod i narzędzi badawczych.

Z punktu widzenia uzyskanych i zaprezentowanych w tekście analiz porównawczych ich poziom jest istotnie zmienny. 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. Wątpliwości budzi dobór danych testowych mający wpływ na powtarzalność i wiarygodność niektórych wyników, ograniczona dokładność predykcji wybranych wskaźników oraz ograniczona analiza statystyczna, w tym pewne braki informacji. Wyczerpujące odniesienie do tej kwestii będzie w dalszej części recenzji.

Jako oryginalny dorobek i główny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Autorka 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.

Należy stwierdzić, iż uzyskane wyniki badań są na wysokim poziomie, a zaproponowane rozwiązania są autorskie dla tego problemu badawczego. Autor dowodzi wysokiej znajomości zarówno narzędzi, jak też badanych procesów chorobowych. Pewnym miernikiem osiągnięć jest też publikacja w *Acta of Bioengineering and Biomechanics* (100 pkt. wg. MNiSW) z 2019 roku, której pierwszym autorem jest mgr inż. Norbert Kapiński. Przedstawione w rozprawie autorskie rozwiązania problemów analizy danych oraz oceny procesów leczniczych stanowią istotny wkład w praktyczne zastosowania techniki

w medycynie. Zakres rozprawy 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. Do uwag ogólnych zaliczam:

1. Znaczne braki z analizie i przedstawieniu danych pod względem charakterystyki statystycznej pacjentów (w szczególności BMI w grupie zdrowych oraz z zerwanym ścięgnem) oraz parametrów rejestracji obrazów (np.: rozdzielczość RM). Przedstawienie rozkładów wspomnianych parametrów można było zrealizować przykładowo na histogramach. Tego typu parametry są kluczowe w prowadzonych badaniach, a zostały całkowicie pominięte.
2. Na poszczególnych etapach analizy wyników zastosowania metody autorskiej nie podano lub są trudne do znalezienia w tekście liczności grup badawczych, w tym podział na dane uczące, weryfikujące oraz testujące. W części testów można znaleźć informację o tylko czterech pacjentach wybranych jako testujących, co podważa wiarygodność wyników pod względem ich ogólności, a użytych klasyfikatorów – jakości generalizacji. Pod względem statystycznym wnioskowanie na czterech próbach (jak podano na stronie 72) jest praktycznie niedopuszczalne z wyjątkiem bardzo szczególnych przypadków (np. chorób rzadkich). W innych przypadkach mowa jest o walidacji krzyżowej (np. s.75) nie podając, czy jest ona wykonana po pacjentach (prawidłowo), czy w inny sposób (jaki?).
3. W niektórych badaniach nie udało się recenzentowi ustalić, czy odnoszą się one do wybranego stanu pacjenta (bezpośrednio po zerwaniu, po kilku tygodniach rehabilitacji), czy też danymi wejściowymi są wszystkie badania wykonane w czasie. Uwaga ta odnosi się do analizy PCA i selekcji cech przedstawionej w podpunkcie 5.2.2 (s.77) oraz wyników w podpunkcie 6.2 (s.105). Całkowitą niewiadomą jest macierz błędów (rys. 5.12, s.93) – dla którego tygodnia rehabilitacji są te wyniki?
4. Niektóre analizy przedstawione są wyrywkowo. Przykładowo w tabeli 5.3 (s.83) porównano tylko cztery wybrane sekwencje RM (nie widzę powodu, dlaczego nie porównywać wszystkich), również bez określenia dla jakich danych zostały one wykonane.
5. Praca posiada istotne braki pod względem analizy statystycznej wyników. Nawet, jeżeli stwierdzono istotność statystyczną, nigdzie w pracy nie podano jaki test został zastosowany oraz czy sprawdzono warunki jego użycia (np. tabele na stronach 83, 112 i 113). 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.

W opinii recenzenta wskazane by było odniesienie się do powyższych uwag w trakcie publicznej obrony doktoratu.

Do uwag natury edytorskiej zaliczam:

6. Brak wykazu skrótów i terminów.
7. Zamiast przymiotnika *unikalny* lepiej jest stosować *unikatowy* (s.4 i dalsze).
8. Wyraz *lokalizacja* nie jest czasownikiem (s.4).
9. Określenie *przebieg pracy* jest dość niefortunne (s.5).

10. (...) nieinwazyjnych technik obrazowania (...) – czy wyróżnia się też inwazyjne? (s.5).
11. Nie zaczynamy zdań od wyrazów „stąd” (s.5), „przy czym” (s.21), „natomiast”(s.24 i dalsze).
12. Zdanie „Ponadto, istotne dane zebrane w duńskim społeczeństwie, przeanalizowane w [39], pokazują również inny czynnik przekładający się na wzrostową tendencję przedmiotowych urazów.” jest nieczytelne – o jaki czynnik chodzi? (s.12).
13. Czy uraz mechaniczny jest czynnikiem wewnętrznym? (s.13).
14. Wzór na stronie 25 zawiera błędnie dwukrotne mnożenie przez 2 oraz posiada niezgodnione jednostki.
15. Czy rzeczywiście ośrodek ma poruszać się z prędkościami fali? (s.25).
16. Określenie „metod charakterystyki tkanki” jest nieprawidłowe językowo. (s.27).
17. Literówki w wyrazach „odniesienia” (s.32), „służące” (s.37).
18. (...) na s segmentów D, z których każdy w innej iteracji służy jako zbiór testujący i walidacyjny, (...) – czy ten sam segment jest walidacyjnym i następnie testującym? (s.42).
19. Określenie PCA jego „state-of-the-art” jest dość odważne, algorytmy takie jak ICA oraz inne wymienione na stronie 48 zależnie od rodzaju danych mogą okazać się skuteczniejsze. (s.47).
20. Wykresy na rys. 4.14 posiadają niekompletne podpisy (s.62).
21. Wartości czułości vs. swoistości na rys. 4.15 są błędne. (s.63).
22. Krzywe ROC zwykle kreśli się w odwróconym zakresie osi X (rys. 4.16, s.64).
23. Powtórzenie „współpracy” w zdaniu na s.66.
24. Cechy Haralick’a oraz odniesienie do publikacji [96] – autor rozprawy nie jest współautorem tej pracy, tak więc wydźwięk tego akapitu jest niejasny (s.69).
25. Czy na rys. 5.1 oraz w metodzie danymi wejściowymi dla warstwy FE są pojedyncze obrazy, czy ich sekwencja? (s.69).
26. Na stronie 72 scharakteryzowano dane wejściowe dla metody jako „(...) opracowane w oparciu o przekroje osiowe (...)” – o jaką oś chodzi? Prawidłowo powinna być brana pod uwagę oś kończyny lub ścięgna, a nie oś skanowania.
27. Co oznacza termin „najgrubsze miejsce”? Czy chodzi tutaj o średnicę, czy najdłuższy wymiar? (s.73).
28. Czy wartość σ w tabeli 5.1 dla GoogleNet jest poprawna (w kontekście zakresu min-max)? (s.75).
29. Na rys. 5.3 zamieszczono porównanie czasów uczenia – czy chodziło o uczenie, czy też douczanie sieci? (s.76).
30. Jeżeli osiągnięto dokładność klasyfikacji na poziomie 99%, to co zmieni reklasyfikacja? (s.76).
31. „Wykorzystując zbiór danych PCA została przeprowadzona analiza czynników głównych...” – zdanie błędne. (s.77).
32. Wyniki zamieszczone w tabeli 5.2 byłyby bardziej czytelne na wykresie z uwzględnieniem wszystkich kolejnych licznosci cech. (s.77).
33. Skąd wynika liczba trzech predyktorów we wzorze 5.3? (s.83).
34. Co oznacza pogrubienie wybranych wartości w tabeli 5.4? Trudno doszukać się jakiejś zależności. (s.85).
35. W jaki sposób zastosowanie kilku modalności RM zwiększa liczbę próbek? (s.102).
36. Zdanie, w którym jest mowa o mniejszym (?) zbiorze pacjentów z oznaczonym pełnym wzorcem odniesienia jest niezrozumiałe. (s.104).
37. Sentencja „(...) co w przypadku badań RM i akwizycji tych samych pacjentów (...)” jest niezrozumiała. (s.105).

38. Dla zbioru ilu pacjentów odnoszą się wyniki zamieszczone w tabelach 6.3 oraz 6.4? (s.107).
39. Na stronie 108 jest mowa o wynikach szkolenia sieci zamieszczonych w tabeli 6.4, podczas gdy w podpisie tabeli wymieniono pacjentów testowych. (s.108).
40. W tabeli 6.5 dla wskaźnika STE najwyższa wartość była dla zastosowania sieci Inteption-v3, a nie Res-Net-50, jak wskazano przez pogrubienie wyniku. (s.108).

Większość błędów edytorskich nie wpływa na czytelność pracy. Wymienione w recenzji braki natury ogólnej nie przekreślają istotnego wkładu Autora pracy w uprawianą tematykę badawczą. Recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania na stopień. Dowodzi temu zarówno zakres danych badawczych, złożoność problemu badawczego, jak również zaawansowany poziom zaproponowanych rozwiązań autorskich.

Konkludując, 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