

Kraków, 03.10.2023 r.

Dr hab. inż. Joanna Jaworek-Korjakowska, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,
Wydział EAIiB, Katedra Automatyki i Robotyki

Recenzja

Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Mateusza Korycińskiego pt.: A hybrid method for tractography in neurosurgery using artificial neural networks and path search algorithms

Dziedzina: nauki techniczne,

Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja.

Niniejszą recenzję przygotowano na podstawie uchwały Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk (IBS PAN) podjętej przez Radę Naukową IBS PAN w dniu 7 lipca 2023, zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. 2020r. poz. 85 z późn. zm.).

Recenzowana praca powstawała pod kierunkiem naukowym prof. dr hab. inż. Ewy Niewiadomskiej-Szynkiewicz oraz promotora pomocniczego dr. inż. Konrada Ciecierskiego.

1. Cel i teza rozprawy

Celem ocenianej rozprawy doktorskiej było opracowanie autorskiej metody analizowania danych dyfuzyjnych z obrazów MRI. Analiza ta opiera się na przetwarzaniu obrazów w trójwymiarowej przestrzeni przy użyciu sieci neuronowych, a także na zastosowaniu spersonalizowanego algorytmu wyszukiwania ścieżek, mającego na celu określenie topologii włókien nerwowych. Przedstawiony w pracy doktorskiej obszar badawczy ma kluczowe znaczenie w kontekście rozwoju dziedziny neuroobrazowania opartej na wykorzystaniu zaawansowanych i hybrydowych algorytmów opartych na sztucznej inteligencji w tym sieci głębokich. Takie badania pozwalają na uzyskanie

głębszego zrozumienia struktury mikroskopowej mózgu i innych obszarów układu nerwowego. W praktyce, precyzyjna analiza dyfuzji molekuł w tkankach neurologicznych umożliwia identyfikację i zrozumienie struktury połączeń między obszarami mózgu, co ma istotne implikacje dla diagnozowania i leczenia chorób neurologicznych, takich jak choroba Alzheimera czy stwardnienie rozsiane. Ponadto, rozwinięcie efektywnych narzędzi analizy obrazów może przyczynić się do szybszego postępu w badaniach nad mechanizmami funkcji mózgu oraz poprawić diagnostykę i monitorowanie skuteczności terapii neurologicznych. Dodatkowo, opracowane metody analizy danych dyfuzyjnych mogą wspomagać planowanie operacji neurochirurgicznych, umożliwiając lekarzom lepsze zrozumienie struktury i połączeń istotnych obszarów mózgu, co przyczynia się do zwiększenia precyzji i bezpieczeństwa procedur chirurgicznych. Ostatecznie, zaawansowane technologie neuroobrazowania nie tylko ułatwiają diagnostykę, ale również wspierają lekarzy w podejmowaniu bardziej skutecznych i spersonalizowanych decyzji terapeutycznych.

Temat rozprawy doktorskiej jest istotny, aktualny i kluczowy ze względu na jego zastosowanie w dziedzinie inżynierii biomedycznej, diagnostyki oraz terapii. Podsumowując, wyznaczony obszar badawczy jest trafny, a zaproponowany cel pracy (Problem statement, str. 1), motywacja (Motivation, str. 2) oraz metodyka i zaimplementowana algorytmika w ramach prowadzonych badań nad rozprawą doktorską ciekawa i obejmująca aktualne rozwiązania.

Należy podkreślić, że recenzowana praca jest interdyscyplinarna, a jej istotny wkład obejmuje zarówno dziedzinę informatyki technicznej i telekomunikacji, jak i inżynierię biomedyczną. Praca ta stanowi połączenie zaawansowanej wiedzy z zakresu algorytmiki z głębokim zrozumieniem problematyki biomedycznej, a autorska metoda analizy danych dyfuzyjnych z obrazów MRI prezentowana w pracy nie tylko przyczynia się do rozwinięcia technologii informatycznych, ale również posiada bezpośrednie zastosowanie i znaczenie praktyczne w obszarze inżynierii biomedycznej, co czyni ją badaniem o wielowymiarowym potencjale i wpływie.

Podsumowując, **teza pracy**, która została przedstawiona na str. 3 może zostać uznana za istotną z punktu widzenia zarówno naukowego (autorskie podejście) jak też w aspekcie przyszłych zastosowań proponowanego rozwiązania w praktyce biomedycznej i diagnostycznej, co zostało potwierdzone poprzez realizację rozprawy doktorskiej w ramach projektów badawczych i we współpracy z NASK PIB.

Teza rozprawy doktorskiej brzmi następująco:

Artificial neural networks coupled with a path search algorithm is an effective and efficient method to compute tractograms.

W celu udowodnienia powyższych tez pracy zrealizowano autorskie metody przetwarzania obrazów obejmujące:

1. Opracowanie i implementacja metody do tworzenia etykiet na podstawie traktogramów uzyskanych różnymi technikami z danych dyfuzyjnych (mapy ścieżek nerwowych);
2. Analiza danych dyfuzyjnych przy użyciu głębokich sieci neuronowych;
3. Implementacja zmodyfikowanej wersji algorytmu A* do wyszukiwania ścieżki w grafie zbudowanym na podstawie wyniku sieci neuronowej (ANN);
4. Opracowanie i implementacja ścieżki postępowania (ang. workflow/pipeline) dla danych rzeczywistych;
5. Przeprowadzenie serii eksperymentów oraz analiza i wizualizacja wyników.

Na podstawie powyższych rozważań oraz uzyskanych wyników można stwierdzić, że hipoteza naukowa pracy, podana na początku niniejszej recenzji została potwierdzona.

2. Przegląd treści rozprawy

Tekst rozprawy liczy 99 strony i został podzielony na 10 dobrze zaplanowanych rozdziałów. Rozprawa doktorska zawiera również 134 pozycje literaturowe, spis skrótów (str. XI) i oznaczeń (str. XII), spis rysunków (str. VIII-IX), spis tabel (str. X) oraz streszczenie (str. I-II). Praca doktorska została napisana w j. Angielskim.

Poniżej przedstawiono szczegółową analizę przeglądu treści rozprawy.

W **rozdziale 1** rozprawy doktorskiej, Doktorant przedstawił motywację prowadzonych badań z perspektywy medycznej. Wnikliwie uzasadnił wybór konkretnego obszaru badawczego, podkreślając potencjalne korzyści wynikające z zastosowania zaawansowanych technik obrazowania. Argumentacja skupiła się na dwóch kluczowych aspektach. Po pierwsze, zaznaczył, że rozwinięcie dokładnych metod obrazowania ma potencjał minimalizowania konsekwencji wynikających z braku precyzji podczas operacji. Dzięki bardziej precyzyjnym danym obrazowym lekarze mają możliwość podejmowania bardziej celowanych i precyzyjnych decyzji podczas zabiegów chirurgicznych, co z kolei przekłada się na zminimalizowanie ryzyka powikłań. Po drugie,

podkreślił, że zaawansowane techniki obrazowania pozwalają unikać potencjalnego uszkodzenia struktur kluczowych dla poprawnego funkcjonowania organizmu.

W rozdziale I Doktorant przedstawia motywację, cel pracy, tezę główną, a także zrealizowane zadania w celu jej udowodnienia. Rozdział zamyka szczegółowy opis poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

W **rozdziale 2** szczegółowo skoncentrowano się na omówieniu podstaw medycznych związanych z anatomią układu centralnego, istocie białej, glejakami oraz charakterystyką techniki obrazowania MRI. Szczegółowo przedstawiono anatomiczne aspekty układu centralnego, skupiając się zwłaszcza na istocie białej, kluczowej dla zrozumienia ścieżek komunikacyjnych w mózgu. Następnie, omówiono problem glejaków, analizując ich cechy i wpływ na struktury mózgowe. Kolejnym kluczowym punktem było omówienie technologii obrazowania rezonansu magnetycznego (MRI), wraz z jej roli w diagnostyce oraz planowaniu przedoperacyjnym. Szczególną uwagę poświęcono także roli traktogramów jako istotnego narzędzia w planowaniu operacji neurochirurgicznych. Wartość tego rozdziału tkwi w kompleksowym zrozumieniu kontekstu medycznego, stanowiącego podstawę dla dalszej analizy oraz opracowywanej w kolejnych rozdziałach metodologii badawczej.

W **rozdziale 3** przedstawiono istotne aspekty związane z głębokimi sieciami neuronowymi i ich zastosowaniem, koncentrując się na procesie uczenia, sposobach treningu, funkcjach aktywacji oraz doboru hiperparametrów. W obszarze sztucznej inteligencji szczegółowo przedstawiono ważne elementy, takie jak mechanizm uwagi, funkcje aktywacji, funkcje straty, a także omówiono wykorzystanie konwolucyjnych (CNN) i rekurencyjnych (RNN) sieci neuronowych. Omówiono szeroko zastosowanie tych technologii w kontekście analizy obrazów w dziedzinie radiologii, przedstawiając przegląd dostępnych rozwiązań i wytrenowanych sieci, a także zwracając uwagę na systemy wspomagające podejmowanie decyzji. Ponadto, rozdział skupił się na obszarze genomiki, ukazując jego znaczenie w kontekście sztucznej inteligencji. Ten rozdział stanowi kompleksowe wprowadzenie do zagadnień związanych z głębokim uczeniem maszynowym oraz sztuczną inteligencją.

Rozdziale 4 pracy doktorskiej jest bardzo krótki, opisany na jedynie 2 stronach. Doktorant dokładnie przedstawia algorytm przeszukiwania ścieżki, a także omawia dwie kluczowe metody w tej dziedzinie: algorytm Dijkstry i algorytm A*. Algorytm przeszukiwania ścieżki pełni istotną rolę w kontekście wyznaczania optymalnych tras w grafach, a analiza algorytmów Dijkstry oraz A* pozwala na zrozumienie ich zasad działania oraz porównanie ich skuteczności w różnych kontekstach aplikacyjnych. Ten

rozdział stanowi ważny wkład w rozwinięcie teoretycznych podstaw algorytmiki, kluczowych dla dalszych analiz i eksperymentacji w obszarze badań przedstawionych w pracy.

Od rozdziału 5 rozpoczyna się właściwa część rozprawy doktorskiej dotycząca zarówno przybliżenia aktualnych rozwiązań jak i przejścia do autorskich rozwiązań w kolejnych rozdziałach. W rozdziale 5 doktorant przedstawił przegląd literatury, który ukazuje aktualny stan wiedzy w obszarze traktogramów. Na rys. 5.1 sklasyfikowano różnorodne metody, które następnie zostały szczegółowo opisane w rozprawie. Dokonano równocześnie systematycznego podziału w zakresie analizy traktogramów. Ponadto, omówiono modele matematyczne, a także dokładnie przeanalizowano różnorodne podejścia wykorzystujące techniki uczenia maszynowego.

Rozdział 6 stanowi właściwą część pracy w której Doktorant opis podejście hybrydowe do tworzenia, detekcji i segmentacji traktogramów. Rys 6.1 przedstawia poszczególne kroki zawierające dane dyfuzyjne, architekturę HyTract ANN, algorytm Path Search Algorithm oraz wynik.

W podrozdziale 6.3 przedstawiono różne podejścia do rozpoznawania wokseli w celu detekcji traktogramów. Podejścia obejmują: wstępne przetworzenie danych wejściowych oraz : a) połączenie danych w jeden wektor, b) analizę oddzielnych modeli oraz fuzję wyników, c) analizę oddzielnych wyników z fuzją danych opartą na wagach.

W podrozdziale 6.4 opisany dostosowany algorytm A^* , który oparty jest na wyjściu z sieci ANN.

W **rozdziale 7** opisano sposób przygotowania danych oraz proces etykietowania (rys. 7.1). Rys. 7.2 przedstawia ekstrakcję istoty białej z wykorzystaniem narzędzi BET oraz MRtrix3. Następnie wyliczono maski funkcjonalne (rys. 7.3, ang. functional masks) oraz przygotowany punkty startowe dla algorytmu (rys 7.4, ang. seeds). Rozdział zamyka opis etykietowania danych

Rozdział 8 zawiera szczegółowe dane dotyczące przeprowadzonych eksperymentów dla algorytmu HyTrackt ANN w tym: scenariusze, opis zbioru danych oraz otrzymane rezultaty. Przedstawiono wymagane wykresy dla procesu uczenia architektur, różnice dla optymalizatorów, wyniki dla różnych rozmiarów wokseli oraz podsumowany przeprowadzone eksperymenty.

W **rozdziale 9** wybrano najlepszą architekturę z poprzedniego rozdziału i zastosowano ją dla algorytmu wyboru najkrótszej ścieżki. Ponownie przedstawiono różne

scenariusze, zbiór danych oraz wyniki dla zmiennych parametrów w tym na przykład okna.

W ostatnim **rozdziale 10** przedstawiono wnioski końcowe z badań, przedstawiono szczegółowy wkład naukowy i otwarte problemy badawcze z rozważanej tematyki. Autorka przedstawia najważniejsze wyniki statystyczne oraz omawia eksperymenty potwierdzające przedstawione tezy w pracy.

Bibliografia pracy jest poprawna, liczy 134 pozycje i jest poprawnie dobrana pod kątem prezentacji rozważanej w pracy problematyki.

3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Podczas lektury recenzowanej rozprawy nasunęły się również pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym. Część z nich ma naturę bardziej ogólną, a część jest szczegółowa.

Uwagi ogólne:

1. Czy w ramach prowadzonych badań przeprowadzono analizę wpływu map ciepła na poprawność rozwiązania?
2. Czy w ramach pracy sprawdzono i przetestowano wpływ połączenia algorytmu wyboru wokseli z wyborem ścieżki w procesie uczenia w celu połączenia błędu?
3. Czy przetestowano rozwiązanie wykorzystujące operacje w przestrzeni 3D do wyboru wokseli bez konieczności utracania informacji przestrzennej?
4. Czy planowane jest wykorzystanie rozwiązań opartych na CNN lub transformerach?

Uwagi szczegółowe:

1. Proszę o szczegółowe omówienie zbiorów danych. Podział został przedstawiony, ale, czy zbiory danych były jednorodne, czy wymagany był etap preprocessingu, ew. jak szczegółowo wyglądał podczas łączenia zbiorów danych. Czy został zachowany poprawny podział na treningowy i testowy?
2. Proszę o szczegółowe omówienie wyników oraz przyjętych metryk statystycznych. Czy oprócz zbioru walidacyjnego był równie wydzielony zbiór testowy? Jakie otrzymano wyniki w trakcie rzeczywistych eksperymentów.
3. Proszę o omówienie procesu augmentacji danych jeżeli był użyty.

4. Ocena formalna

Od strony formalnej tekst rozprawy doktorskiej nie budzi większych zastrzeżeń jest zgodna z normami przyjętymi w pracach naukowych. Brak większych zastrzeżeń w zakresie formalności jest zauważalnym atutem, podkreślającym profesjonalne podejście do pisania. Autor dokonał starannego przestrzegania zasad formalnych, co przekłada się na przejrzystość i czytelność całego dokumentu.

Praca zawiera jednak błędy językowe, drobne błędy stylistyczne i interpunkcyjne. Praca napisana jest w języku angielskim.

Uwagi:

- Zbyt krótkie opisy rysunków, powinny być bardziej rozbudowane pozwalające na zrozumienie zawartości;
- Pozostawione znaki interpunkcyjne np. str. 77 " Figure 9.4 and 9.5)"
- Błędy językowe np. Figure 9.4 and 9.5 show, a nie shows
- Str. 71 "Two-fold", powinno być "two-fold"
- Opis Fig. 29: Exemples, a powinno być Examples

Powyższe niedoskonałości językowe nie mają wpływu na zrozumienie treści pracy, ani nie utrudniają czytania; są one zazwyczaj występujące w tego typu publikacjach naukowych. Układ pracy jest również poprawny, co oznacza, że zawarte w niej rozdziały są logicznie uporządkowane, co ułatwia zrozumienie struktury pracy jak i części merytorycznej.

5. Podsumowanie

Zakres i poziom naukowy uzyskanych wyników badawczych odpowiadają w pełni ustawowym i zwyczajowym wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim określonym w ustawie z dn. 20 lipca 2018 r (Dz. U. 2020r. poz. 85 z późn. zm.). Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnioskuje zatem do Wysokiej Komisji powołanej przez Radę Naukową Instytutu Badań Systemowych PAN przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora, mgr inż. Mateusza Korycińskiego do publicznej obrony.

Jewrel