

Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: „*Segmentacja i trójwymiarowa wizualizacja zmian patologicznych gruczołu sutkowego w obrazach USG z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji*”

Autor rozprawy: mgr inż. Marta Biesok

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Paweł Badura, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr Jan Juszczyk

Dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: inżynieria biomedyczna

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Marty Biesok, która została opracowana na zlecenie wyrażone w piśmie RDIB.002.75.2023 z dnia 17 lipca 2023r. Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej (prof. dr. hab. inż. Ewy Piętki).

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska podejmuje temat badań nad wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do segmentacji guzów piersi w dwuwymiarowych obrazach ultrasonograficznych (USG) uzyskiwanych z wykorzystaniem systemu nawigacji obrazowej, celem rekonstrukcji i wizualizacji modelu trójwymiarowego. W ramach rozprawy Doktorantka opracowała sposób przetwarzania obrazów USG za pomocą zmodyfikowanej metody rozmytej spójności w celu pozyskania danych do segmentacji semantycznej z wykorzystaniem splotowej sieci neuronowej. Na podstawie wysegmentowanych obrazów USG 2D i odpowiadających im macierzy transformacji pozyskanych z systemu nawigacji obrazowej, opracowała w efekcie autorską metodę trójwymiarowej rekonstrukcji guzów piersi zależną od czasu akwizycji ramki obrazu 2D oraz zaimplementowała ją w zaprojektowanej aplikacji interaktywnej. Doktorantka przeprowadziła również szczegółową analizę parametrów zastosowanych metod w celu ich optymalizacji czasowo-jakościowej, oceniła dokładność opracowanej metody rekonstrukcji obrazów 3D za pomocą specjalnego fantomu w postaci obiektu testowego oraz przetestowała zaprojektowaną aplikację na danych pomiarowych uzyskanych z badania fantomu biopsyjnego piersi z zasymulowanymi zmianami patologicznymi.

Tematyka rozprawy jest istotna i aktualna zarówno z perspektywy badawczej jak i aplikacyjnej. Dysertacja napisana jest w języku polskim, zawiera łącznie 122 strony i składa się z 7 rozdziałów wraz ze stroną tytułową, podziękowaniami, spisem treści, streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisami rysunków, tabel, skrótów i oznaczeń, bibliografią oraz dodatkiem prezentującym szczegółowe wyniki wybranych eksperymentów.

Rozdział 1 (Wprowadzenie) obejmuje 16 stron i zawiera ogólne wprowadzenie do tematu rozprawy dotyczące raka piersi i stosowanych obecnie metod diagnostyki obrazowej piersi. W rozdziale tym Doktorantka omówiła również zagadnienia związane z nawigacją obrazową oraz scharakteryzowała systemy nawigacji obrazowej wykorzystywane obecnie w medycynie zabiegowej.

W **Rozdziale 2 (Cele i metodyka pracy)** obejmującym 5 stron rozprawy Autorka przedstawiła tezy i cel pracy, jak również opisała zastosowaną metodykę oraz narzędzia informatyczne i sprzętowe wykorzystane do realizacji tego celu. Rozdział zawiera też zwięzły opis układu rozprawy.

W kolejnym osiemnastostronicowym **Rozdziale 3 (Segmentacja guzów piersi w obrazach ultrasonograficznych)** Doktorantka scharakteryzowała metody wstępnego przetwarzania sekwencji obrazów USG i metody segmentacji dwuwymiarowej oraz przedstawiła opracowaną autorsko, wieloetapową metodę segmentacji wykorzystującą splotowe sieci neuronowe oraz aktywne kontury i rozmytą spójność.

Rozdział 4 (Trójwymiarowa rekonstrukcja zależna od czasu akwizycji obrazu) obejmujący 10 stron rozprawy poświęcony został na omówienie opracowanej metody trójwymiarowej rekonstrukcji guzów piersi zależnej od czasu akwizycji obrazu i opartej na danych pozyskanych w wyniku segmentacji obrazów oraz danych z kalibrowanego systemu nawigacji.

Rozdział 5 (Wizualizacja trójwymiarowa i graficzny interfejs użytkownika) liczący 7 stron zawiera opis modułu wizualizacji rezultatów segmentacji i rekonstrukcji przykładowej zmiany patologicznej piersi pozyskanej z obrazów USG 2D z wykorzystaniem systemu nawigacji śledzącego położenie i ruch głowicy USG.

W najbardziej obszernym i istotnym **Rozdziale 6 (Eksperymenty, wyniki i dyskusja)** liczącym 31 stron, Autorka dokonała weryfikacji poprawności działania opracowanego algorytmu segmentacji na podstawie trzech eksperymentów obejmujących ocenę jakości dwuwymiarowej segmentacji obrazów z wykorzystaniem danych klinicznych, ocenę jakości rekonstrukcji wolumenu 3D z wykorzystaniem danych laboratoryjnych oraz symulację badania w warunkach klinicznych z wykorzystaniem biopsyjnego fantomu piersi oraz systemu nawigacji obrazowej.

Rozdział 7 (Podsumowanie) stanowi krótkie 5-stronicowe podsumowanie przeprowadzonych badań, w którym Doktorantka w syntetyczny sposób opisała wykonane prace, uzyskane rezultaty i osiągnięcia.

Rozprawę uzupełnia **Bibliografia**, która liczy 129 pozycji. Literatura przedmiotu cytowana przez Doktorantkę jest dobrana prawidłowo i w znakomitej większości są to pozycje anglojęzyczne.

Układ rozprawy jest poprawny. Treści rozprawy zostały logicznie podzielone na rozdziały, a ich zawartość i zakres nie budzą zastrzeżeń. Zagadnienia związane z wprowadzeniem do tematu rozprawy, przedstawieniem tezy, celu i metodyki pracy zostały zawarte w 2 rozdziałach rozprawy (**1, 2**) liczących łącznie 21 stron (tj. ok. 17 % całej rozprawy). Zagadnienia bezpośrednio związane z opracowaniami nowych metod, badaniami i eksperymentami oraz analizą uzyskanych wyników zrealizowanymi w ramach rozprawy przez Doktorantkę zawarte zostały w 5 rozdziałach rozprawy i w dodatku do rozprawy (**3, 4, 5, 6, 7, Dodatek A**) liczących łącznie 75 stron (tj. 61 % całej rozprawy).

Rozprawa dotyczy badań z zakresu aktualnych i najnowszych osiągnięć nauki w realizowanym przez Doktorantkę obszarze tematycznym i świadczy o szerokiej znajomości zagadnień literatury przedmiotu w zakresie metod przetwarzania obrazów medycznych, co tematycznie zawiera się w dyscyplinie inżynierii biomedycznej. Nieinwazyjne i nieszkodliwe trójwymiarowe obrazowanie ultrasonograficzne w czasie rzeczywistym z systemem śledzenia głowicy skanującej jest pożądanym narzędziem w badaniach medycznych, ponieważ umożliwia pozyskiwanie interaktywnych informacji zwrotnych w postaci wysokiej jakości obrazów zmian patologicznych w wizualizowanym obszarze wraz z informacją o ich przestrzennym położeniu, co jest bardzo pomocne w czasie operacji i zabiegów chirurgicznych. Obecnie prowadzone są badania w tym zakresie, jednak do tej pory nie opracowano jeszcze automatycznego i interaktywnego systemu z efektywnymi algorytmami przetwarzania obrazów umożliwiającymi precyzyjną wizualizację i lokalizację przestrzenną zmian patologicznych piersi w czasie rzeczywistym.

2. Oryginalne osiągnięcia rozprawy

W wyniku szybkiego rozwoju technologii obliczeniowych i sensorycznych, systemy śledzenia są obecnie szeroko wykorzystywane w różnych dziedzinach, w tym, w robotyce, wojsku, medycynie i sporcie. W dziedzinie medycyny, śledzenie rotacji i translacji instrumentów medycznych lub pacjentów odgrywa istotną rolę w wielu ważnych zastosowaniach, takich jak obrazowanie diagnostyczne, systemy nawigacji obrazowej w chirurgii i terapii, a także w medycynie rehabilitacyjnej. Z kolei obrazowanie ultrasonograficzne (USG) jest dobrze ugruntowaną metodą wizualizacji, która jest szeroko wykorzystywana w praktyce klinicznej do diagnozowania chorób lub podejmowania decyzji terapeutycznych. Zaletami USG są: obrazowanie w czasie rzeczywistym, brak ekspozycji na promieniowanie, niski koszt i łatwe zastosowanie w różnorodnych badaniach diagnostycznych ciała ludzkiego. Pomimo wielu zalet, ultrasonografia jest jednak uważana za metodę zależną od operatora. Ze względu na konieczność ręcznego prowadzenia sondy USG, trudno jest uzyskać powtarzalne wyniki obrazowania, co wiąże się z wysokim ryzykiem błędu interpretacyjnego wpływającego na wyniki diagnozy i terapii. Ograniczone pole widzenia sondy USG prowadzonej ręcznie utrudnia wizualizację, lokalizację i charakteryzowanie właściwości zmian patologicznych. Ponadto, do prawidłowej interpretacji informacji uzyskanych podczas skanowania wymagane jest duże doświadczenie kliniczne lekarzy. Wiele z tych problemów można rozwiązać poprzez integrację systemu śledzenia obiektów z dwuwymiarowym obrazowaniem USG i trójwymiarową rekonstrukcją obrazu segmentowanych automatycznie lub półautomatycznie zmian patologicznych, wspomaganą przez sztuczną inteligencję. W ciągu ostatniej dekady zintensyfikowano badania nad integracją ultrasonografów z różnymi systemami śledzenia przeznaczonymi do zastosowań medycznych, co skutkuje poprawą dokładności i obrazowania USG i nawigacji przy mniejszym uzależnieniu od umiejętności operatora. Zagadnienia poruszone w recenzowanej rozprawie doktorskiej dotyczą właśnie badań nad opracowaniem półautomatycznej metody segmentacji i trójwymiarowej rekonstrukcji zmian patologicznych gruczołu sutkowego z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i systemu nawigacji obrazowej, uwzględniając przesunięcia struktur tkankowych w czasie, podczas skanowania USG. Dokładność wyznaczania granic zmiany patologicznej ma istotne znaczenie ze względu na dokładność rekonstrukcji granic jej modelu trójwymiarowego. Główną wadą obecnie stosowanych rozwiązań jest wrażliwość uzyskanego modelu 3D na deformacje i przesunięcia spowodowane uciskiem i prowadzeniem głowicy USG po skórze pacjenta w trakcie badania. Tematyka rozprawy jest więc nowatorska, ważna i aktualna.

Za cel rozprawy Autorka przyjęła opracowanie metodyki półautomatycznej trójwymiarowej segmentacji i rekonstrukcji guzów piersi w oparciu o serię zorientowanych przestrzennie obrazów ultrasonograficznych. Cel rozprawy został trafnie i jasno sformułowany. Na potrzeby realizacji celu pracy Doktorantka wykazała, że:

- możliwa jest wiarygodna półautomatyczna segmentacja zmiany patologicznej na dwuwymiarowym obrazie ultrasonograficznym z wykorzystaniem różnych metod sztucznej inteligencji,
- wykorzystanie informacji o czasie rejestracji obrazu USG poprawia jakość rekonstrukcji wolumenu w przypadku obiektów zmieniających swoje położenie podczas śledzenia.

Na potrzeby realizacji celu Doktorantka sformułowała następującą tezę główną rozprawy:

„Wykorzystanie informacji obrazowej podczas badania ultrasonograficznego umożliwi segmentację i orientację przestrzenną trójwymiarowego modelu zmiany patologicznej w oparciu o dwuwymiarowe obrazy typu B.”

Doktorantka dążyła do udowodnienia postawionej tezy poprzez realizację zadań naukowo-badawczych obejmujących zaprojektowanie metodyki analizy obrazów ultrasonograficznych, pozyskanie i przygotowanie baz danych obrazowych, skonstruowanie stanowiska pomiarowego, opracowanie wieloetapowej metody segmentacji guzów nowotworowych z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych, metody rekonstrukcji i wizualizacji trójwymiarowych modeli guzów uwzględniającą wpływ

przesunięcia struktur tkankowych w czasie. Poprawność postawionej tezy zweryfikowała w eksperymentach i testach na fantomach oraz na danych klinicznych. W rezultacie Doktorantka zrealizowała cel rozprawy oraz udowodniła postawioną tezę wykazując, że opracowana w rozprawie metoda wykorzystująca sztuczną inteligencję w porównaniu do stosowanych klasycznych metod pozwala na poprawę dokładności rekonstrukcji trójwymiarowej w przypadku struktur przemieszczających się podczas rejestracji obrazów USG 2D.

Dorobek publikacyjny Doktorantki potwierdza, że zdobyła ona szeroką wiedzę w zakresie tematyki swoich badań oraz, że Jej osiągnięcia zostały zaprezentowane i zweryfikowane w środowisku naukowym. Wszystkie publikacje mgr. inż. Marty Biesok są pracami współautorskimi, co w obszarze dziedzin eksperymentalnych raportujących wyniki uzyskane za pomocą skomplikowanych technik badawczych wskazuje na umiejętność twórczej pracy w zespole i jest istotne w szczególności przy realizacji projektów naukowo-badawczych. Według danych zawartych w bazie *Web of Science (WoS)* na dzień 19.09.2023r, Doktorantka jest współautorką 6 publikacji, w tym 4 artykułów w wysoko punktowanych czasopismach naukowych z tzw. listy filadelfijskiej (*Medical Image Analysis: IF = 10.9, 200 pkt. na liście czasopism MEiN; Computerized Medical Imaging and Graphics: IF = 5.7, 100 pkt. na liście czasopism MEiN; IEEE Access: IF = 3.9, 100 pkt. na liście czasopism MEiN*) oraz 2 referatów z konferencji międzynarodowej. Według bazy *Web of Science* na dzień 19.09.2023, publikacje te **cytowane były 22-krotnie** z wyłączeniem autocytowań, a indeks Hirsha Doktorantki wynosi 4.

Za najważniejsze osiągnięcia i oryginalny dorobek Doktorantki uznają:

1. Opracowanie wieloetapowej metody segmentacji zmian nowotworowych piersi z wykorzystaniem metody spłotowych sieci neuronowych oraz metody aktywnych konturów i zmodyfikowanej metody rozmytej spójności.
2. Opracowanie metody trójwymiarowej rekonstrukcji zmian nowotworowych piersi zależnej od momentu rejestracji obrazu, z wykorzystaniem systemu nawigacji obrazowej.
3. Zaprojektowanie interaktywnego interfejsu graficznego umożliwiającego wizualizację trójwymiarowych modeli zmian patologicznych piersi.

Wymienione osiągnięcia wnoszą istotny wkład Doktorantki w rozwój dyscypliny inżynieria biomedyczna i stanowią podstawę do dalszych badań, które mogą zaowocować opracowaniem uniwersalnej metody trójwymiarowej segmentacji i rekonstrukcji zmian patologicznych gruczołu sutkowego w czasie rzeczywistym, przeznaczonej do zastosowań w medycynie zabiegowej.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Wysoko oceniam rozprawę mgr. inż. Marty Biesok i trudno mi znaleźć w niej wady, które mogłyby na tę ocenę wpłynąć. Drobna niespójność znajduję jedynie we Wprowadzeniu (Rozdz. 1), w którym Autorka zgodnie z tematem pracy odnosi się do badań gruczołu sutkowego, natomiast w opisie systemów nawigacji obrazowej takiego odniesienia już nie ma. Można byłoby omówić te systemy oraz sposoby ich wykorzystania przy zabiegach na piersi.

Szkoda, że przy prezentacji przykładowych wyników segmentacji uzyskanych za pomocą opracowanej metody Doktorantka nie zamieściła dodatkowo dla porównania obrysu zmiany patologicznej dokonanej przez eksperta.

Do obliczania widoków rozmytej spójności Autorka wykorzystwała w pracy algorytm Dijkstry z modyfikacją funkcji rozmytego powinowactwa poprzez wprowadzenie dodatkowej zmiennej opisującej relację między rozważanymi punktami a punktem startowym. Zabieg taki premiuje struktury w kształcie zbliżonym do koła, tymczasem złośliwe guzy nowotworowe gruczołu sutkowego charakteryzują się często nieregularnym kształtem. Czy w charakterze dyskusji w czasie obrony Autorka mogłaby przeanalizować tę modyfikację w tym kontekście? Czy nie powoduje to błędów w segmentacji struktur o nieregularnych kształtach? Czy można byłoby pokazać wyniki rekonstrukcji za pomocą opracowanych

przez Doktorantkę metod dla zmiany patologicznej o nieregularnych kształtach? Czy w takich przypadkach wykorzystanie informacji o czasie rejestracji obrazu USG również poprawia jakość rekonstrukcji wolumenu?

4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Redakcja rozprawy jest bardzo staranna, z czytelnymi ilustracjami dobrej jakości. Wyniki zostały przedstawione umiejętnie i przekonująco, a zagadnienia zaprezentowano w sposób jasny i zwięzły.

W rozprawie znalazłem tylko nieliczne błędy gramatyczne (np. personifikacja rysunku – str 34: „Rys. 3.4 przedstawia schemat ...”) oraz kilka drobnych błędów redakcyjnych:

1. str 33, wiersz po wzorze (3.11) – błędne użycie dwóch spójników równocześnie: „... oznaczają maskę filtru **oraz** i wartości stałe ...”,
2. str 36, wiersz 7 od dołu – „a” zamiast „ą”: „... rekonstrukcję morfologiczną, **wykorzystujaca** ...”,
3. str 65, wiersz po tabeli 6.1 – błąd opisu: Autorka pisze, że „Struktura III oferuje najwyższe wyniki pod względem mediany i trzeciego kwartyła”, tymczasem w tabeli wyraźnie widać, że chodzi o Strukturę II,
4. str 77, ostatni wiersz – brak „o”: „... co **świadczy aktualności** narzędzia w dziedzinie.”,
5. str 80, wiersz 5 po rys.6.15 – powinno być „również”: „... zaprojektowany został **równie** wirtualny model ...”.

Przytoczone błędy nie powodują trudności w zrozumieniu zagadnień, czy też w interpretacji wyników i w kontekście oceny całości redakcji pracy nie mają istotnego znaczenia.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Mgr inż. Marta Biesok w oryginalny sposób rozpracowała problem naukowy posługując się biegłe właściwie dobranymi narzędziami matematycznymi oraz stosując zaawansowane metody obliczeniowe, metody przetwarzania obrazów i techniki pomiarowe. Przedłożona do oceny rozprawa doktorska, jej sposób realizacji wraz z uzyskanymi wynikami, analizami i wnioskami wykazują, że Autorka posiada umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych, jak również wiedzę na zaawansowanym poziomie o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk inżyniersko-technicznych oraz o charakterze szczegółowym, związanym z obszarem prowadzonych badań naukowych w dyscyplinie inżynierii biomedycznej. Postawiony w rozprawie problem naukowy został przez Autorkę prawidłowo przeanalizowany i szczegółowo rozpracowany.

W konkluzji stwierdzam, że mgr inż. Marta Biesok dowiodła postawionej tezy oraz wniosła istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria biomedyczna.

Recenzowana rozprawa doktorska z nadmiarem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

W związku z nowatorską tematyką ocenianej rozprawy, której wynikiem jest oryginalne opracowanie oraz biorąc pod uwagę dorobek naukowy Autorki, uważam, że praca zasługuje na wyróżnienie. Badania przeprowadzone przez Autorkę pracy stanowią istotny przyczynek badawczo-rozwojowy w zakresie trójwymiarowej segmentacji i rekonstrukcji zmian patologicznych gruczołu sutkowego z wykorzystaniem systemu nawigacji obrazowej.

Krzysztof Gzellincki