

Zabrze, 12.02.2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy:

**Optymalizacja procedur badawczych w komputerowej rekonstrukcji
i analizie matematycznej obrazów mikrotomograficznych**

Autor rozprawy: **mgr inż. Paweł LIPOWICZ**

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Agnieszka DARDZIŃSKA-GŁĘBOCKA, prof. PB**

Promotor pomocniczy: **dr hab. inż. Marta BOROWSKA**

Dziedzina: **nauk inżynieryjno-technicznych**

Dyscyplina: **inżynieria biomedyczna**

Recenzja została przygotowana w związku z uchwałą Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej nr 78/2024-2028 z dn. 26.11.2025 r.

1. Temat, zakres i cel rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska porusza temat komputerowej rekonstrukcji obrazów tomograficznych, w szczególności tomografii komputerowej (TK) i mikrotomografii (μ TK), co lokuje ją w zakresie tematycznym deklarowanej dyscypliny naukowej. Autor definiuje szereg metod i raportuje eksperymenty obliczeniowe dotyczące rekonstrukcji i przetwarzania obrazów tomograficznych pod kątem redukcji określonych typów zakłóceń. Autorski wkład mgr. Pawła Lipowicza obejmuje opracowanie i weryfikację metod redukcji artefaktów ringowych i metalicznych oraz modelu głębokiej sztucznej sieci neuronowej do segmentacji obiektów metalicznych. Badania wykorzystują dane syntetyczne oraz rzeczywiste obrazy μ TK zebrane przez zespół z Politechniki Białostockiej w latach 2008-2011.

Rozprawa napisana w języku polskim zawiera 145 stron i jest podzielona na sześć rozdziałów oraz aneks. Bibliografia obejmuje 150 pozycji właściwie dobranych i wykorzystanych w pracy, w tym dwie, których współautorem jest mgr Lipowicz.

Rozdział 1. stanowi wyczerpujące wprowadzenie w opisywaną tematykę. W pierwszej kolejności Autor przedstawia pojęcie tomografii komputerowej, jej podstawy fizyczne, kolejne generacje aparatów, zasady tworzenia obrazów TK i μ TK oraz istotność diagnostyczną obrazowania tą techniką. Teoria jest wsparta zależnościami fizycznymi oraz ilustracjami. W kolejnych dwóch sekcjach następuje opis typowych zakłóceń oraz metody redukcji dwóch typów artefaktów: ringowych i metalicznych, co zawęży narrację do zagadnień poruszanych w dalszej części rozprawy. Autor wprowadza następnie szereg wykorzystywanych później metod przetwarzania i analizy obrazów, w tym dyskretną transformatę falkową (DWT), empiryczną dekompozycję modów (EMD), metody filtracji, czy modele uczenia głębokiego bazujące na splotowych sztucznych sieciach neuronowych. Wprowadzone są również miary ilościowe umożliwiające ocenę opracowanych algorytmów. Rozdział jest sporządzony bardzo dobrze, wydaje się być kompletny i poświadcza ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

W rozdziale 2. Doktorant formułuje cztery cele szczegółowe badań oraz dwie tezy badawcze. Celami są: (1) dokonanie porównania wybranych metod rekonstrukcji obrazów TK, (2) opracowanie i implementacja algorytmu detekcji i redukcji artefaktów ringowych, (3) podobne zadanie w odniesieniu do artefaktów metalicznych i (4) przeprowadzenie eksperymentów oceniających ilościowo i jakościowo opracowane narzędzia. Tezy różnią się poziomem ogólności i stanowią, że: (1) odpowiednia rekonstrukcja i redukcja artefaktów umożliwia ocenę budowy struktury kostnej na określonym poziomie dokładności i szybkości przetwarzania oraz (2) metody interpolacyjne przetwarzające sinogramy i projekcje są w stanie zredukować artefakty ringowe i metaliczne w obrazach μ TK.

Rozdział 3. przedstawia wykorzystane dane i metody opracowane przez Autora w ramach celów badawczych nr 2 i 3. W pracy stosowane są dwa rodzaje danych: syntetyczne (fantom głowy i fantom Shepp-Logan) oraz rzeczywiste. Drugą grupę stanowią obrazy μ TK głów 156 szczurów z różnymi rodzajami implantów w obszarze żuchwy (obrazy z grupy kontrolnej nie zawierają implantów). Baza jest rezultatem projektu badawczego zespołu z Politechniki Białostockiej z lat 2008-2011. W drugiej sekcji rozdziału opisano dokładnie sprzęt komputerowy zastosowany w badaniach oraz środowisko implementacji rekonstrukcji i przetwarzania

obrazów. Następnie Doktorant opisuje metodę redukcji artefaktów ringowych w sinogramach opartą o dekompozycję falkową i filtrację z wykorzystaniem metody empirycznej dekompozycji modów (EMD). Ostatnią częścią rozdziału jest opis algorytmu redukcji artefaktów metalicznych złożonego z dwóch zasadniczych części: segmentacji obiektów o zwiększonej pochłanialności i filtracji projekcji.

Opis wyników i ich bieżące omówienie zawiera rozdział 4. Stosując metody i miary wprowadzone wcześniej Autor realizuje cele pracy nr 1 i 4. Cztery komponenty części eksperymentalnej to: (1) porównanie jakościowe i czasowe szeregu metod rekonstrukcji, (2) ocena metody redukcji artefaktów ringowych z wykorzystaniem fantomu Shepp-Logan i danych rzeczywistych, (3) ocena jakości segmentacji projekcji (wyodrębniania obiektu o zwiększonej pochłanialności) w obrazach rzeczywistych oraz (4) ocena metody redukcji artefaktów metalicznych w fantomie Shepp-Logan i obrazach rzeczywistych.

W rozdziałach 5. i 6. usystematyzowano i podsumowano wyniki eksperymentów, odniesiono się do postawionych celów i tez oraz sformułowano wnioski.

2. Ogólna ocena rozprawy

Autor rozprawy opracował zbiór procedur związanych z rekonstrukcją i analizą sinogramów bądź projekcji TK/ μ TK. Problematyka została nakreślona poprawnie, a elementy rozwiązań dobrano właściwie i przetestowano z wykorzystaniem zróżnicowanych danych. W celu weryfikacji metodyki wykorzystano dwa typy danych (syntetyczne i rzeczywiste), dopasowując eksperymenty i metryki do możliwości oceny ilościowej. Ta była stosunkowo prosta w przypadku danych syntetycznych, lecz trudniejsza w przypadku danych rzeczywistych. W tym drugim przypadku, również dla celów uczenia i weryfikacji modelu segmentacyjnego, Autor przygotował dodatkowe dane – ręczne obrysy implantów na wybranych projekcjach – oraz zastosował metryki bezreferencyjne BRISQUE, NIQE i PIQE. Dobór zbiorów danych i procedur weryfikacyjnych do poszczególnych etapów badań uważam za właściwy.

W dalszej części niniejszej sekcji recenzji odnoszę się do kolejnych celów zdefiniowanych przez Doktoranta. Rozpaczynam od celu nr 4: przeprowadzenia eksperymentów oceniających ilościowo i jakościowo opracowane narzędzia, ponieważ potwierdzenie realizacji celów nr 1-3 bazuje na wynikach eksperymentów. Autor przeprowadził i opisał eksperymenty w sposób rzetelny. Informacje zamieszczone w tabelach i na ilustracjach są czytelne i omówione poprawnie. Wszędzie, gdzie to możliwe, dokonano analizy ilościowej, a w przypadku obrazów rzeczywistych przeprowadzono analizę jakościową (wizualną). Kilka uwag odnośnie eksperymentów umieszczam we fragmentach recenzji odnoszących się do odpowiednich celów.

Cel nr 1, dokonanie porównania wybranych metod rekonstrukcji obrazów TK, obejmował analizę czasu i wierności rekonstrukcji metodą analityczną oraz algorytmami algebraicznymi (łącznie 12 wariantów). Uzyskane wyniki wskazują na niezaskakujące zależności: najdokładniejsze algorytmy (iteracyjne) wymagają dłuższych czasów obliczeń, a wokół implantów o dużej pochłanialności promieniowania występują największe artefakty niezależnie od metody rekonstrukcyjnej. Pamiętając, że miary czasowe są w tym wypadku względne i zależne od sprzętu, uzyskane wyniki można uznać za interesujący materiał porównawczy. Efek-

tem analizy był uzasadniony wybór jednego z narzędzi (FDK z filtracją Ram-Lak) jako rekonstruktora w dalszych badaniach.

Cel nr 2, opracowanie i implementacja algorytmu detekcji i redukcji artefaktów ringowych, Doktorant zrealizował proponując algorytm przedrekonstrukcyjnego przetwarzania sinogramów. Jego dwoma głównymi komponentami są dekompozycja falkowa do redukcji wyraźnych artefaktów oraz empiryczna dekompozycja modów do redukcji artefaktów o niskich intensywnościach. Zaproponowaną metodę uważam za ciekawą i sformułowaną poprawnie. Jest ona silnie sparametryzowana, w szczególności w części wykorzystującej DWT. Autor zweryfikował wykorzystanie różnych rodzin falek przy różnym stopniu zakłóceń. Można żałować, że w rozdziale 4. przeprowadzono analizę wpływu tylko jednego parametru metodyki, szerokości okna progowania k , podczas gdy inne parametry podano arbitralnie (np. poziom progowania T czy poziom dekompozycji L). Sugeruję, by przygotowując prezentację rozprawy Doktorant miał na uwadze bieżące uzasadnianie wyborów podjętych odnośnie parametrów (patrz również uwaga szczegółowa nr 1 w dalszej części tej sekcji). Swoją drogą, optymalizacja k pod kątem miary jest w zasadzie wielokryterialna – kryteriami są MSE oraz rozmiar maski/czas przetwarzania (minimalizacja). Zastanawiam się również, czy było możliwe porównanie ilościowe do algorytmów przedstawionych w pracach [67,68], które Autor sam wskazuje na str. 116 rozprawy.

Cel nr 3, zaprojektowanie metody detekcji i redukcji artefaktów metalicznych (MAR) niewrażliwej na kształt i materiał obiektu, obejmuje dwa rozwiązania: segmentację projekcji pod kątem wyodrębnienia implantu oraz redukcję zakłócenia wykorzystując wieloaspektową filtrację projekcji. Do realizacji segmentacji Autor wybrał czteropoziomowy model głęboki U-Net++ z trójskładnikową funkcją błędu poprzedzony filtracją CLAHE. Co typowe w podobnych zadaniach, Doktorant musiał zmierzyć się z problemem ilości danych niewystarczającej do nauczania głębokiej sieci neuronowej i, co również jest powszechnym rozwiązaniem, zaproponował metody augmentacji danych. Przy uwagach zamieszczonych dalej odnośnie augmentacji i statystycznej interpretacji wyników, uznaję zaproponowane podejście za poprawne, a wartości uzyskanych metryk jakości segmentacji za satysfakcjonujące. Sygnalizuję, że podczas publicznej obrony będę zainteresowany szczegółami dotyczącymi danych uczących i rezultatów segmentacji (np. na przekrojach, z grupy kontrolnej). Drugi krok to kilkuetapowa analiza projekcji i maski implantu z normalizacją, wagowaniem funkcją Gaussa i filtracją trymowanej średniej. Tej części również dotyczy uwaga o oczekiwanej gotowości do uzasadnienia doboru parametrów. Efekty działania metody MAR porównane do wziętej z literatury metody NMAR są ilościowo i wizualnie zadowalające (z uwzględnieniem uwagi szczegółowej nr 4). Na koniec komentarz do samego sformułowania celu nr 3 na str. 59: Doktorant stwierdza, że metoda MAR ma być oparta m.in. o analizę sinogramu, jednak nie znalazłem ostatecznie takiej relacji.

Autor wymienia następujące trzy elementy oryginalne rozprawy:

1. Zastosowanie DWT w połączeniu z metodą EMD w celu redukcji artefaktów ringowych w obrazach μ TK.
2. Wykorzystanie modelu U-Net++ z przetwarzaniem wstępnym metodą CLAHE do wyodrębnienia obiektu o wysokiej pochłaniałości w projekcjach tomograficznych.
3. Zastosowanie masek wagowych i trymowanej filtracji krawędzi do redukcji artefaktów metalicznych.

Lektura rozprawy pozwala potwierdzić prawdziwość powyższego wypunktowania. Realizacja celów badawczych z powyższym oryginalnym wkładem Doktoranta oraz uzyskane wyniki potwierdzają obydwie tezy badawcze: tę ogólną (nr 2) i tę szczegółową (nr 1).

Struktura rozprawy jest poprawna i czytelna. Doktorant bardzo dobrze posługuje się językiem polskim, a jego zdolność do sporządzenia rozprawy doktorskiej nie budzi zastrzeżeń. Usterki redakcyjne lub językowe są bardzo nieliczne, wymieniałbym tu jedynie kilka: literówkę we wzorze (34) – „F” zamiast „FN”; pleonazm „najbardziej optymalny” na str. 66; błąd gramatyczny w pierwszym zdaniu sekcji 5.2; niezrozumiałe stosowanie zasady pisowni wielką literą nazw metryk w sekcji 5.3 (np. „Precyzja”; w innych sekcjach pisownia jest poprawna).

Lektura rozprawy nasuwa kilka uwag i pytań o charakterze merytorycznym bądź dyskusyjnym. Proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do wymienionych poniżej szczegółowych komentarzy:

1. Czy zależności wprowadzone w sekcji 3.4.1 są w pełni autorskie, czy zaczerpnięte z literatury? Interesują mnie szczególnie wzory (53)–(54), z dość intrygującym wykorzystaniem pierwiastka czwartego stopnia z jednego z parametrów. Jeśli propozycje są oryginalne, to czy mogę prosić o podanie motywacji lub raportu z ewentualnych testów innych wariantów zależności?
2. Jak należy traktować wartość „ $p=100\%$ ” przy opisie poziomego odbicia obrazu, transpozycji i nieregularnego zniekształcenia siatki jako operacji augmentacji (str. 75–76)? Jeśli jest to prawdopodobieństwo wykonania danej operacji na obrazie oryginalnym w danej epoce uczenia, to (1) trudno mówić o „losowych” modyfikacjach, jeśli są pewne; (2) o ile nieregularne zniekształcenia siatki są zapewne dodatkowo parametryzowane w sposób losowy, to poziome odbicie i transpozycja są jednoznaczne. Czy w takim razie z zapisu nie wynika, że zastosowanie ich w każdej epoce ze stuprocentową pewnością oznacza, że sieć uczyła się wyłącznie na obrazach odbitych i dodatkowo transponowanych (plus dodatkowe losowe zniekształcenia)? Czyli – innymi słowy – nie uczyła się w ogóle na obrazach oryginalnych o normalnej orientacji?
3. Przedstawiona w sekcji 4.3 ocena statystyczna uzyskanych metryk jakości segmentacji jest dosyć nietypowa (Autor sam zauważa w dyskusji na str. 118, że „W dostępnej literaturze nie odnaleziono podobnie przeprowadzonej oceny statystycznej przeprowadzonej dla metryk skuteczności segmentacji”). Dlaczego akurat porównanie median metryk z wartością referencyjną równą 0,9? Wartość wygląda na wybraną arbitralnie bez uzasadnienia (dlaczego nie 0,89 albo 0,91?). Poza tym 0,9 ma zupełnie inną interpretację np. dla dokładności i pokrycia. Zastosowanie testów statystycznych do oceny uzyskanych wyników miałoby uzasadnienie, gdyby porównywać się do zbioru wyników innego algorytmu uzyskanego na tej samej bazie danych.
4. Doktorant przeprowadza dokładną analizę wizualną wyników redukcji artefaktów metalicznych na obrazach syntetycznych i rzeczywistych (rys. 41, 44, 45 w rozdziale 4. oraz dyskusja na str. 118). Zabrakło mi jednak komentarza na temat zauważalnego efektu rozmycia krawędzi obiektu metalicznego w efekcie zastosowania autorskiej metody MAR, większego niż w przypadku metody NMAR. Czy zdaniem Autora może to stanowić problem? Proszę o komentarz i – w miarę możliwości – przygotowanie wizualizacji obrazów różnicowych przypadków z rys. 41 w odniesieniu do obrazu referencyjnego.

5. W sekcji 5.4 Autor pisze: „Komputery osobiste dysponują zbyt niską mocą obliczeniową, a rekonstrukcje wymagają wielogodzinnych procesów.” Na ile jest to realny problem? Czysta rekonstrukcja nie jest typowo wykonywana na komputerach osobistych, lecz w urządzeniach lub towarzyszących im wysokowydajnych stacjach roboczych.

Po zapoznaniu się z rozprawą i przy uwzględnieniu uwag mogę stwierdzić, że **Autor osiągnął zakładane cele badawcze. Nie ma również podstaw do odrzucenia tez badawczych.** Metody zostały opracowane, opisane i zwalidowane rzetelnie. Uzyskane wyniki ilościowe uzasadniają sformułowane koncepcje i założenia w ogólności i w szczegółach.

3. Podsumowanie i konkluzja

Lektura rozprawy wskazuje na dobrą orientację Doktoranta w eksplorowanej dziedzinie. Potrafi on przedstawić problem w sposób poprawny, posiłkując się literaturą przedmiotu, co uzasadnia opinię, że rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Podjęty problem badawczy jest istotny, a jego rozwiązanie przez Autora jest oryginalnym wkładem. Zaplanowane, przeprowadzone i opisane eksperymenty wskazują na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W konkluzji szczegółowej opinii sformułowanej i uzasadnionej w niniejszej recenzji stwierdzam zatem, że przedstawiona do recenzji rozprawa **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria biomedyczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**, a jej przedmiotem jest **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, a zatem spełnia warunki, stawiane rozprawom doktorskim w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z powyższym zwracam się do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Lipowicza do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

