



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Gdańsk, 12.02.2026

dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek, prof. uczelni
Katedra Inżynierii Biomedycznej
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Lipowicza „Optymalizacja procedur
badawczych w komputerowej rekonstrukcji i analizie matematycznej obrazów
mikrotomograficznych”**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana magistra inżyniera Pawła Lipowicza „Optymalizacja procedur badawczych w komputerowej rekonstrukcji i analizie matematycznej obrazów mikrotomograficznych”. Recenzowana rozprawa została przygotowana w Politechnice Białostockiej, pod kierownictwem dr. hab. inż. Agnieszki Dardzińskiej-Głębockiej, prof. PB oraz promotora pomocniczego dr. hab. inż. Marty Borowskiej i przedłożona Radzie Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej. Recenzję sporządzono na podstawie pisma sygnowanego przez Przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej, prof. dr. hab. inż. Romualda Mosdorfa, w którym informuje o podjętej przez Radę Naukową uchwale powołującej mnie na recenzenta w/w rozprawy doktorskiej.

1. Jaki problem naukowy (teza) został rozwiązany i przedstawiony w rozprawie?

W recenzowanej rozprawie Doktorant podjął się problemu opracowania metod redukcji wybranych typów artefaktów (pierścieniowych i metalicznych) w rekonstrukcji obrazów w tomografii komputerowej. Praca koncentruje się na porównaniu efektów osiąganych klasycznymi metodami redukcji owych artefaktów z opracowaniami autorskimi Doktoranta. W eksperymentach Doktorant wykorzystywał fantomy wirtualne (głowy, Shepp-Logan) oraz rzeczywiste skany mikrotomograficzne (żuchwa szczura z wszczepionym implantem metalicznym). Doktorant sformułował cel ogólny oraz cele szczegółowe, które usystematyzowały prace zrealizowane w ramach doktoratu. Cele szczegółowe pracy obejmują: 1. Porównanie ilościowe jakości oraz czasu

realizacji wybranych analitycznych i algebraicznych metod rekonstrukcji obrazów tomograficznych na podstawie fantomów i danych empirycznych; 2. Opracowanie i implementację algorytmu detekcji oraz redukcji artefaktów pierścieniowych w sinogramach oraz porównanie skuteczności opracowanych metod interpolacyjnych i filtracyjnych w eliminacji artefaktów względem obrazów referencyjnych, ocenę wpływu filtracji na jakość obrazu końcowego po rekonstrukcji; 3. Zaprojektowanie autorskiej metody MAR (Metal Artifact Reduction) opartej na analizie sinogramu i maski obszaru o wysokim współczynniku pochłaniania promieniowania, w tym opracowanie modelu sztucznej sieci neuronowej w celu wyznaczania masek obszaru o wysokiej gęstości w projekcjach tomograficznych, zastosowanie adaptacyjnego skalowania oraz filtracji krawędzi w celu redukcji artefaktów metalicznych, porównanie skuteczności zaproponowanej metody z klasycznym podejściem NMAR oraz obrazem bez filtracji; 4. Przeprowadzenie eksperymentów na danych syntetycznych (fantomowych) i rzeczywistych (skan żuchwy szczura z implantem metalicznym), w tym ocena skuteczności metod na podstawie wskaźników ilościowych (RMSE, PSNR, SSIM, MS-SSIM, VIF, BRISQUE, NIQE, PIQE) i finalnie analiza wizualna rekonstrukcji z wykorzystaniem powiększonych wycinków i przekrojów. Ostatecznie Doktorant zdefiniował dwie tezy pracy doktorskiej:

1. Opracowanie procedur rekonstrukcji i redukcji artefaktów umożliwia dokładną (z dokładnością do 100 μm) ocenę budowy struktury kostnej wokół implantu przy zachowaniu czasu realizacji procesu poniżej 4s/tomogram;
2. Zastosowanie dedykowanych metod interpolacyjnych opartych na analizie sinogramu oraz lokalnych właściwościach projekcji pozwala na skuteczne ograniczenie artefaktów ringowych oraz metalicznych w obrazach mikrotomograficznych.

Tezy zdefiniowano prawidłowo, chociaż podanie w pierwszej tezie konkretnego czasu przetwarzania – 4 sekundy na tomogram, bez podania zaangażowanej mocy obliczeniowej jednostki obliczeniowej jest dyskusyjne.

Podjęta w rozprawie tematyka redukcji artefaktów jest wciąż aktualny pomimo opracowanych i wdrożonych wielu algorytmów. Metody te mają szereg wad począwszy od ich selektywności, na utracie/zamaskowaniu informacji diagnostycznych na zrekonstruowanych obrazach tomograficznych kończąc. Celem rozprawy było opracowanie algorytmów rekonstrukcji obrazu minimalizujących wpływ artefaktów przy jednoczesnym zachowaniu niezmiennego poziomu złożoności obliczeniowej. Zarówno zaproponowana metoda redukcji artefaktów pierścieniowych, jak i algorytm MAR (Metal Artifact Reduction) spełniły to kryterium projektowe. Ich implementacja umożliwiła uzyskanie obrazów jednorodnych i o zwiększonej czytelności, przy zachowaniu istotnych informacji diagnostycznych. Skuteczność metod została potwierdzona zarówno poprzez analizę

ilościową z wykorzystaniem obiektywnych metryk jakości obrazu, jak i ocenę jakościową przeprowadzoną na podstawie wizualnej analizy uzyskanych rekonstrukcji.

2. Struktura rozprawy doktorskiej

Praca składa się z 145 stron i podzielona jest na 6 rozdziałów, bibliografię oraz spisy tabel, rysunków i listingi wybranych fragmentów kodu aplikacji. Układ rozdziałów jest poprawny, logiczny. Rozprawa napisana jest starannie, zawiera odwołania do tabel, rysunków i pozycji bibliograficznych, wyszczególnionych w kolejności cytowań w tekście rozprawy.

Rozdział pierwszy (48 stron) stanowi przegląd stanu wiedzy. Zawiera wstęp dotyczący zagadnień tomografii komputerowej, począwszy od podstaw fizycznych metody, budowy lampy rentgenowskiej, kolejnych generacji tomografów, poprzez metody rekonstrukcji, występujących artefaktów i sposobów ich redukcji. Rozdział został opracowany na podstawie 150 pozycji bibliograficznych, w tym 2 publikacje współautorskie Doktoranta.

Rozdział drugi to opis motywacji podjęcia się problematyki eliminacji artefaktów w tomografii komputerowej w ramach rozprawy doktorskiej. Doktorant zdefiniował w tym rozdziale cele ogólne oraz szczegółowe zrealizowanych badań i eksperymentów oraz zdefiniował w nim dwie tezy rozprawy.

Rozdział trzeci (21 stron) jest rozdziałem, w którym Doktorant zaprezentował warsztat badawczy wykorzystany podczas realizacji rozprawy doktorskiej. W rozdziale tym opisano realizację zaproponowanych autorskich metod redukcji artefaktów pierścieniowych oraz artefaktów metalicznych, z użyciem modelu uczenia maszynowego w celu segmentacji regionu implantu metalowego.

Rozdział czwarty (29 stron) to zestawienie przykładowych wyników eksperymentów zaimplementowanych metod rekonstrukcji obrazów tomograficznych wraz z zaimplementowanymi metodami redukcji artefaktów pierścieniowych oraz metalicznych. W rozdziale tym zawarto dyskusję wyników i porównanie z najpopularniejszymi stosowanymi algorytmami poprawy obrazów tomograficznych.

Całościowe osiągnięcia prowadzonych badań Doktorant podsumował w rozdziale piątym (10 stron) „Dyskusja i podsumowanie”. Zaś wnioski końcowe umieścił w ostatnim rozdziale 6 (3 strony).

Wrażenie ogólne po przeczytaniu rozprawy jest bardzo dobre. Rozprawa została przygotowana starannie, z użyciem poprawnej polszczyzny, a opracowane rysunki zasługują na wyróżnienie. Po zakończeniu czytania pozostaje jednak pewien niedosyt, bowiem Doktorant zbyt ogólnikowo zarysował plan dalszych prac i możliwych zastosowań rozważanych metod (ograniczył się do kilku akapitów dotyczących dalszego kierunku badań), brakuje propozycji metod poprawy wydajności

rekonstrukcji tomogramów i eliminacji artefaktów, np. analizy możliwości zrównoleglenia przetwarzania. Taki rozdział przyszłościowy byłby niewątpliwie inspiracją dla kolejnych doktorantów, a może planem dalszej kariery naukowej Doktoranta.

3. W jaki sposób Doktorant rozwiązał problem, jakich użył metod i jakich to wymagało umiejętności?

Aby udowodnić postawione w rozprawie tezy konieczne było zrealizowanie celów/zadań cząstkowych opisanych w pierwszym punkcie recenzji. Doktorant wykonał wszystkie wymagane działania, posługując się sprawnie, przedstawionym w szczegółach w rozdziale drugim, aparatem matematycznym oraz metodami badawczymi opisanymi w rozdziale trzecim. W celu przeprowadzenia eksperymentów konieczna była również umiejętność sprawnego programowania w języku Python oraz znajomość wymaganych bibliotek i pakietów programistycznych. Na uwagę zasługuje idea wykorzystania zmodyfikowanego modelu SI U-Net ++ do segmentacji struktur o dużej gęstości, w pracy chodziło o struktury implantów metalowych (podrozdział 3.5.1). Wymagało to od Doktoranta opanowania nowoczesnych technik uczenia maszynowego, modyfikacji modeli SI, przygotowywania danych obrazowych do uczenia i testowania opracowanego modelu SI. W efekcie nabyte umiejętności i kompetencje pozwoliły na realizację pracy doktorskiej z sukcesem.

4. Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Autor zaproponował kompleksowe podejście do problemu redukcji najczęściej występujących artefaktów w obrazach tomograficznych i mikrotomograficznych, obejmujące zarówno artefakty pierścieniowe, jak i metaliczne. W zakresie artefaktów pierścieniowych opracowano metodę bazującą na analizie sinogramu z wykorzystaniem dekompozycji falkowej do detekcji pozycji defektów oraz interpolacji w obszarach ich występowania. Procedurę uzupełniono o globalną filtrację opartą na metodzie EMD (Empirical Mode Decomposition), co stanowi rozwiązanie hybrydowe łączące podejście lokalne i globalne.

W odniesieniu do artefaktów metalicznych zaproponowano autorską metodę MAR, wykorzystującą dedykowane techniki interpolacyjne oparte na analizie lokalnych właściwości projekcji oraz adaptacyjnym ważeniu z użyciem wag Gaussowskich i trymowanej filtracji krawędziowej. Kluczowym elementem procedury jest wyznaczanie maski metalu przy użyciu wytrenowanego modelu sieci neuronowej U-Net++, co umożliwia precyzyjną lokalizację implantu w projekcjach i ograniczenie ingerencji algorytmu wyłącznie do obszarów wymagających korekcji.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że opracowane procedury rekonstrukcji i redukcji artefaktów umożliwiają ocenę struktury kostnej wokół implantu z dokładnością rzędu 100 μm przy

zachowaniu czasu przetwarzania poniżej 4 s na tomogram. Uzyskane parametry świadczą o praktycznym charakterze proponowanych rozwiązań oraz ich potencjalnej użyteczności w badaniach przedklinicznych.

Pierwsza teza rozprawy została zweryfikowana poprzez:

- porównawczą analizę jakościową i ilościową wybranych metod analitycznych i algebraicznych rekonstrukcji obrazów tomograficznych wraz z oceną czasu ich realizacji,
- ocenę skuteczności redukcji artefaktów pierścieniowych na danych empirycznych,
- porównanie autorskiej metody MAR z metodą NMAR na danych fantomowych oraz rzeczywistych.

Druga teza, dotycząca skuteczności dedykowanych metod interpolacyjnych opartych na analizie sinogramu i lokalnych właściwościach projekcji w ograniczaniu artefaktów pierścieniowych i metalicznych, została potwierdzona w toku przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

W przypadku artefaktów pierścieniowych eksperymenty przeprowadzone na danych syntetycznych oraz rzeczywistych wykazały skuteczną redukcję artefaktów przy zachowaniu integralności struktur anatomicznych. W odniesieniu do artefaktów metalicznych zaproponowana metoda istotnie przewyższyła klasyczną metodę NMAR pod względem metryk jakości obrazu (RMSE, PSNR, SSIM, MS-SSIM, VIF, BRISQUE, PIQE, NIQE), zarówno na danych fantomowych, jak i rzeczywistych.

Zakres zrealizowanych badań należy ocenić jako szeroki i dobrze zaplanowany. W ramach pracy:

- wykonano akwizycję 156 preparatów żuchwy szczura z wszczepionymi implantami w obrębie łuku żuchwy,
- przeprowadzono analizę dokładności i czasu realizacji rekonstrukcji dla metod analitycznych i algebraicznych,
- opracowano i zweryfikowano procedurę detekcji oraz redukcji artefaktów pierścieniowych w sinogramie,
- zaimplementowano i wytrenowano model U-Net++ do generowania masek implantu,
- opracowano autorską metodę MAR z interpolacją adaptacyjną,
- zaproponowano własną parametryzację obu metod redukcji artefaktów,
- przeprowadzono kompleksową walidację na fantomach syntetycznych oraz danych rzeczywistych (implanty: tytanowe, tytan+bioszkło, bioszkło, bioresorbowalne),
- przeanalizowano wpływ filtracji na dokładność odwzorowania struktur w bezpośrednim sąsiedztwie metalu,
- dokonano porównania jakościowego i ilościowego z metodą NMAR oraz rekonstrukcją bez filtracji.

Przedstawione wyniki wskazują, że Autor nie ograniczył się do implementacji znanych rozwiązań, lecz zaproponował własne, spójne koncepcyjnie metody, poddane wieloaspektowej walidacji eksperymentalnej. Całość pracy cechuje konsekwencja metodologiczna oraz wyraźne ukierunkowanie na aspekt praktyczny i aplikacyjny.

5. Jaka jest szansa dalszego wykorzystania wyników rozprawy?

Obecnie stosowane metody redukcji artefaktów pierścieniowych oraz metalicznych, mimo udokumentowanej skuteczności, nadal wykazują istotne ograniczenia zarówno w zakresie efektywności klinicznej, jak i złożoności obliczeniowej. W literaturze podkreśla się, że algorytmy działające w dziedzinie sinogramu (np. filtracja adaptacyjna, normalizacja kolumn detektora) są obliczeniowo relatywnie tanie, jednak mogą prowadzić do nadmiernego wygładzania sygnału i utraty drobnych struktur diagnostycznych. Z kolei metody iteracyjne i modele oparte na optymalizacji (np. regularyzacja TV, modele statystyczne Poissona) wykazują wyższą skuteczność w redukcji artefaktów pierścieniowych, lecz ich koszt obliczeniowy rośnie wraz z rozdzielczością danych i liczbą iteracji.

Analogiczna sytuacja dotyczy redukcji artefaktów metalicznych (MAR). Klasyczne metody interpolacyjne w sinogramie są szybkie, lecz mogą generować wtórne artefakty i utratę informacji strukturalnej w pobliżu implantów. Zaawansowane podejścia iteracyjne oraz techniki oparte na modelowaniu fizycznym wiązki promieniowania (uwzględniające zjawiska takie jak twardnienie wiązki czy rozpraszanie) osiągają lepsze wyniki ilościowe (redukcja błędu HU, poprawa SSIM), jednak wymagają znacznych zasobów obliczeniowych. Coraz częściej stosowane metody głębokiego uczenia również wykazują wysoką skuteczność, lecz ich implementacja wymaga dużych zbiorów danych treningowych oraz wydajnych jednostek GPU. W świetle powyższego istnieje uzasadniona potrzeba opracowania rozwiązań, które:

- zachowują równowagę między skutecznością a złożonością obliczeniową – np. poprzez ograniczenie liczby iteracji, zastosowanie przybliżonych modeli fizycznych lub lokalnych metod regularyzacji,
- minimalizują degradację informacji diagnostycznej – co powinno być weryfikowane zarówno metrykami ilościowymi (PSNR, SSIM, RMSE), jak i oceną ekspercką,
- są możliwe do realizacji na komputerze osobistym średniej klasy – co implikuje ograniczenie zapotrzebowania na pamięć operacyjną, unikanie pełnych rekonstrukcji iteracyjnych o dużej liczbie projekcji oraz optymalizację operacji macierzowych,
- pozostają kompatybilne z istniejącymi pipeline'ami rekonstrukcyjnymi – szczególnie z algorytmem FBP (Filtered Back Projection), który wciąż dominuje w praktyce klinicznej ze względu na szybkość działania.

Zaproponowane udoskonalenia procesu redukcji artefaktów i późniejszej rekonstrukcji obrazów przez Doktoranta wpisuje się w proces rozwoju i udoskonalania metod diagnostyki obrazowej. Dotychczasowe prace wymagają dalszych etapów optymalizacji wykorzystujących najnowsze osiągnięcia techniki w konstrukcji tomografów jak i technik informatycznych i obliczeniowych. Niemniej widzę potencjał wdrożenia zoptymalizowanego rozwiązania chociażby w postaci alternatywnego oprogramowania do analizy i wizualizacji badań tomograficznych. Takie podejście ma szczególne znaczenie w kontekście badań przedklinicznych, laboratoriów akademickich oraz zastosowań inżynierskich, gdzie dostęp do infrastruktury wysokowydajnych obliczeń bywa ograniczony.

6. Jakiej wiedzy, umiejętności oraz kompetencji i na jakim poziomie nabył Doktorant w wyniku realizacji rozprawy?

Na podstawie zakresu i charakteru zrealizowanych badań można stwierdzić, że w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej Doktorant osiągnął wysoki, zaawansowany poziom wiedzy, umiejętności badawczych oraz kompetencji właściwy dla 8 poziomu Polskiej Ramy Kwalifikacji (odpowiadającego poziomowi doktoratu).

Z zakresu Wiedzy Doktorant wykazał się pogłębioną, specjalistyczną wiedzą obejmującą:

- fizyczne podstawy tomografii rentgenowskiej i mikrotomografii, w tym modelowanie projekcji, zjawiska twardnienia wiązki, rozpraszania oraz wpływ niejednorodności detektora na powstawanie artefaktów;
- metody rekonstrukcji obrazów tomograficznych – zarówno analityczne (np. FBP), jak i algebraiczne oraz iteracyjne, wraz z analizą ich złożoności obliczeniowej i właściwości numerycznych;
- teorię przetwarzania sygnałów i obrazów, w szczególności dekompozycję falkową, metody EMD, filtrację adaptacyjną, interpolację w dziedzinie sinogramu;
- metody redukcji artefaktów pierścieniowych i metalicznych (MAR) oraz ich ograniczenia;
- podstawy i zastosowania głębokich sieci neuronowych w obrazowaniu medycznym, w tym architekturę U-Net++ oraz zagadnienia segmentacji obiektów w projekcjach tomograficznych;
- metryki oceny jakości obrazu (PSNR, SSIM, MS-SSIM, VIF, BRISQUE, PIQE, NIQE) oraz ich interpretację w kontekście diagnostycznym.

Zakres tej wiedzy wykracza poza standardowy program kształcenia i obejmuje aktualne, specjalistyczne zagadnienia badawcze.

Z zakresu Umiejętności Doktorant nabył zaawansowane umiejętności badawcze i techniczne, w szczególności:

- projektowanie i implementacja autorskich algorytmów rekonstrukcji i redukcji artefaktów, z uwzględnieniem ograniczeń obliczeniowych;
- opracowanie i parametryzacja metod hybrydowych, łączących analizę lokalną (sinogram) i globalną (EMD);
- implementacja i trenowanie modeli uczenia głębokiego do segmentacji struktur w obrazach;
- planowanie i realizacja badań eksperymentalnych, w tym akwizycja danych biologicznych, przygotowanie fantomów oraz kontrola zmiennych eksperymentalnych;
- wielokryterialna walidacja metod z wykorzystaniem zarówno obiektywnych metryk ilościowych, jak i analizy jakościowej;

Poziom tych umiejętności odpowiada samodzielnemu prowadzeniu badań naukowych i tworzeniu nowych rozwiązań algorytmicznych.

Z zakresu Kompetencje społeczne i badawcze - realizacja pracy świadczy również o rozwinięciu kompetencji typowych dla samodzielnego badacza:

- umiejętność krytycznej oceny istniejących metod i wskazywania ich ograniczeń;
- kompetencje w zakresie zarządzania złożonym projektem badawczym, obejmującym część eksperymentalną, algorytmiczną i analityczną;
- orientacja na aspekt praktyczny i translacyjny badań, w tym uwzględnienie ograniczeń sprzętowych.

Zakres zdobytej wiedzy, stopień samodzielności badawczej oraz opracowanie i eksperymentalna weryfikacja autorskich metod pozwalają stwierdzić, że Doktorant osiągnął dojrzałość badawczą właściwą dla samodzielnego pracownika naukowego. Efekty realizacji rozprawy wskazują, że Doktorant jest przygotowany do prowadzenia badań naukowych w obszarze przetwarzania obrazów medycznych oraz rekonstrukcji tomograficznej.

7. Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Zakres tematyczny rozprawy obejmuje zagadnienia znajdujące się w aktualnym nurcie badań nad rekonstrukcją tomograficzną i redukcją artefaktów w obrazowaniu medycznym oraz mikrotomografii. Doktorant w rozprawie cytuje 150 pozycji bibliograficznych. Są to publikacje aktualne, z ostatnich lat, istotne dla rozważanych w rozprawie zagadnień, jak również publikacje z lat wcześniejszych, co daje możliwość prześledzenia postępów w zakresie tematycznym rozprawy.

W szczególności tematyka redukcji artefaktów pierścieniowych koncentruje się na:

- analizie w dziedzinie sinogramu z wykorzystaniem metod wieloskalowych (wavelet, curvelet),
- podejściach hybrydowych łączących filtrację lokalną i globalną,

- adaptacyjnych technikach interpolacyjnych,
- metodach opartych na modelowaniu statystycznym oraz uczeniu maszynowym.

Zastosowanie dekompozycji falkowej oraz podejścia łączącego detekcję defektów w sinogramie z globalną filtracją (np. EMD) wpisuje się w nurt metod wieloskalowych i adaptacyjnych, które są rozwijane m.in. w pracach publikowanych w *Optics Express*, *Physics in Medicine & Biology* czy *IEEE Transactions on Image Processing*. Aktualne badania podkreślają konieczność minimalizacji utraty detali anatomicznych przy jednoczesnym ograniczeniu kosztu obliczeniowego — co jest zgodne z kierunkiem przyjętym w rozprawie.

W zakresie redukcji artefaktów metalicznych (MAR) - problem MAR pozostaje jednym z kluczowych wyzwań współczesnej tomografii, szczególnie w kontekście:

- obrazowania implantów ortopedycznych i stomatologicznych,
- mikrotomografii przedklinicznej,
- integracji metod fizycznego modelowania z podejściami opartymi na uczeniu głębokim.

W literaturze z ostatnich lat obserwuje się trzy główne kierunki rozwoju: iteracyjne metody modelowe uwzględniające fizykę wiązki, metody interpolacyjne nowej generacji (NMAR i modyfikacje), metody oparte na deep learning (U-Net, U-Net++, GAN) publikowane m.in. w *Medical Physics*, *Physics in Medicine & Biology* oraz *IEEE Transactions on Medical Imaging*.

Zastosowanie segmentacji obszaru metalu z użyciem architektury U-Net++ oraz adaptacyjnej interpolacji w sinogramie odpowiada aktualnemu trendowi łączenia klasycznych metod MAR z narzędziami głębokiego uczenia. Tego typu rozwiązania są obecnie intensywnie rozwijane w literaturze z lat 2020–2024. Można zatem stwierdzić, że tematyka rozprawy obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki w zakresie przetwarzania obrazów tomograficznych oraz redukcji artefaktów, a zaproponowane rozwiązania sytuują się w aktualnym, dynamicznie rozwijającym się obszarze badawczym. Pozwala to stwierdzić, iż Doktorant zdobył wiedzę z dyscypliny naukowej i zagadnień, których dotyczy niniejsza rozprawa doktorska.

8. Dyskusja, słabe strony pracy i uwagi krytyczne

Praca prezentuje wysoki poziom merytoryczny, charakteryzuje ją również pokaźny potencjał wdrożeniowy. Zdaniem recenzenta istnieją aspekty, których zabrakło w rozprawie, a które mogą przyczynić się do optymalizacji systemu i procedury rekonstrukcji z uprzednią redukcją dwóch typów artefaktów. W aspekcie zwiększenia wydajności obliczeniowej: Jak można byłoby zaadresować w dalszych badaniach aspekt skrócenia czasu eliminacji artefaktów i całej rekonstrukcji obrazów tomograficznych? Czy można zrównoleglić obliczenia w algorytmach? Co z możliwościami kart

graficznych i obliczeń CUDA? W przypadku takich modyfikacji możliwe byłoby skrócenie procesu rekonstrukcji. Bowiern największy zysk czasu uzyskuje się przez (1) przeniesienie na GPU najcięższych operatorów (projekcja/rekonstrukcja), (2) ograniczenie transferów CPU↔GPU, (3) zrównoleglenie/pipelining całego łańcucha: preprocessing sinogramu → rekonstrukcja → postprocessing/ocena. W klasycznych rekonstrukcjach (FBP/FDK) wąskim gardłem jest back projection (oraz – zależnie od implementacji – filtracja/FFT i dostęp do pamięci). To właśnie te kroki są najbardziej „GPU-friendly” i od lat przyspieszane w literaturze. Czy Doktorant optymalizował swój kod w takim aspekcie.

Skąd w sformułowaniu tezy pierwszej deklaracja konkretnej wartości liczbowej 4sekundy/tomogram? Przy jakich tak naprawdę dodatkowych założeniach ta deklaracja jest wiążąca?

W tekście rozprawy brakuje jasnej deklaracji kto wykonywał badania mikrotomograficzne preparatów żuchwy szczurów. Czy wykonywał je osobiście doktorant, czy też dostał gotowe zbiory danych.

Doktorant deklaruje, że badania prowadzono w środowisku programistycznym Python w wersji 3.8. Dlaczego Autor nie wykorzystywał środowiska w nowszej wersji. To samo pytanie dotyczy wersji pozostałych wykorzystywanych bibliotek: NumPy, OpenCV, itd.

Na czym polegała współpraca z Andre Biguri podczas opracowywania autorskiego skryptu importującego dane z mikrotomografu Skyscan 1172.

Na podstawie analizy wykresów na rys. 40 Doktorant wyciągnął wniosek „Rys. 40 pokazuje, że metoda autorska (kolor niebieski) zachowała dużo lepiej strukturę obiektu metalicznego w porównaniu do metody NMAR (kolor czerwony).” Czy może Doktorant wyjaśnić na podstawie jakiego kryterium wyciągnął taki wniosek. Jaką miarę zastosował na oszacowanie „dużo lepiej”?

Zaproponowane algorytmy przetwarzania wymagają ustalenia wartości wybranych parametrów (np. szerokość okna progowania k , poziom progowania T , poziom dekompozycji L). Doktorant czynił to na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i nabytego doświadczenia. Czy Doktorant zastanawiał się nad możliwościami opracowania automatycznej i obiektywnej metody doboru tych parametrów? Co ewentualnie można byłoby wykorzystać, jakie cechy sinogramu, surowych danych, zrekonstruowanego tomogramu do wyznaczenia wartości tych parametrów?

Strona edycyjno-redakcyjna pracy

Praca napisana jest poprawnym językiem. Największe zastrzeżenie budzi stosowanie terminu „artefakty ringowe” co jest kalką językową z języka angielskiego. W języku specjalistycznym z zakresu tomografii komputerowej i przetwarzania obrazów medycznych zdecydowanie częściej stosuje się termin „artefakty pierścieniowe”. Przymiotnik pierścieniowy jest formą bardziej neutralną i zgodną

z normą języka naukowego, podczas gdy ringowy ma charakter zapożyczenia i bywa uznawany za potoczny lub środowiskowy.

Razi natomiast w pracy wiele błędów edycyjnych, np. związanych z pominięciem zastosowania polskich znaków diakrytycznych (końcówek wyrazów wynikających z odmiany np. przez przypadki). Wymienię niektóre z nich:

- przypadkowy sposób odwoływania się do literatury tematu. W wielu miejscach Doktorant odwołuje się do konkretnej pozycji poprzez podanie nazwiska pierwszego autora i indeksu na spisie literatury, np.: str. 34, pierwszy akapit – „...opisana w pracy Rivers i inni [64],...”, gdy wcześniej i kilka stron później odnośnik jest tylko do indeksu w spisie literatury, a jeszcze w innym miejscu pojawia się wyłącznie nazwisko pierwszego autora, np.: str. 38, 7 wiersz od góry – „Prell i inni opracowali ciekawy...”, oraz str. 47, drugi akapit po wzorze – „W analizie porównawczej przeprowadzonej przez Azad i inni wykazano, że główną ...”

Taki sposób odwoływania się do literatury implikował inny rodzaj błędów związanych z zastosowaniem raz liczby mnogiej, a w kolejnym zdaniu liczby pojedynczej o opisie wkładu autorów do tematyki zagadnienia, np.: str. 3, drugi akapit – „Kachelriess i inni [82] **rozwinęli** metodę podejściem wielowymiarowym do filtrowania i **zastosował** filtry trójwymiarowe.”

Inne niedociągnięcia:

Niefortunne sformułowanie na stronie 67, drugi akapit – „Algorytm **wykonywał** rekonstrukcję ...” i dalej żargon w opisie podrozdziału 3.4. „Opracowano algorytm redukcji artefaktów ringowych bazujący na DWT, **która** skutecznie identyfikuje **ringi** o intensywności ...” oraz „**Ringi** mogą być o wartościach bliskich 0 jak i **wartości** maksymalnych” – to mało inżynierskie określenia i żargonowa ringi (kalka językowa).

Na rys. 21 i 25 brakuje warunku rozgałęzienia bloku „Dla każdego sinogramu”, „Dla każdej projekcji”.

Na rys. 29, 30, 31 przy takiej prezentacji – rozmiarze obrazów na wydruku nie można dostrzec różnic.

Na rys. 32 – brakuje legendy, co uniemożliwia interpretację wyników.

W rozprawie zdarzają się często, tzw. „literówki lub błędy odmiany. Oto niektóre z przykładów:

- str. 34, ostatni akapit – „Tabela 1 przedstawia zestawienie wybranych publikacji poświęconych metodom redukcji artefaktów ringowych i zawiera **informacje** dotyczącą typu danych ...”

- str. 38, 3 wiersz od góry – „Techniki reprojekcji polegają na **tworzenie** nowych projekcji ...”

- str. 75 od góry strony – „... funkcje opartą na współczynniku Dice'a i funkcje straty skupienia”,

- str. 77, od góry strony – „Strategia wcześniejszego zatrzymania procesu monitoruje **wybranej** metryki i w przypadku braku poprawy przez określoną liczbę epok **stopuje** proces.”,

- str. 77, dalej – Zbiór ten zawierał 50 losowo wybranych projekcji z zestawów danych, **które** nie wykorzystano...”,

- str. 96, akapit pod rysunkiem - „Spośród prezentowanych obrazów rzeczywistych **najmniejsza** liczba artefaktów zidentyfikowano i zminimalizowano...”

Można by jeszcze wymieniać kolejne przykłady.

Ostatnia uwaga do spisu literatury. Pozycje opisane są niestarannie. Pomiędzy nazwiskami zdarza się łącznik angielski „and” (np. poz.1, 10, 18 i kolejne). Dodatkowo wydaje się zbyt rygorystyczne podejście Doktoranta do opisu manuskryptu ograniczając się tylko do wymienienia pierwszego autora - poz. 4, 5 i kolejne. Jaką przesłanką się kierował Doktorant wymieniając w wybranych przypadkach dwóch lub trzech kolejnych autorów, a w innych ograniczył się tylko do jednego autora. Dobrze byłoby też podać dodatkowo w opisie numer DOI, co już jest praktyką w cytowaniach.

Wymienione mankamenty nie umniejszają wartości rozprawy.

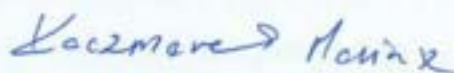
Wnioski końcowe

Rozprawa została sumiennie przygotowana i zredagowana. Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy i zaproponował jego rozwiązanie opracowując własny, autorski algorytm redukcji artefaktów pierścieniowych oraz autorskie rozwiązanie redukcji artefaktów metalicznych.

Zaproponowane rozwiązanie, mimo kilku krytycznych uwag, jest cenne i stanowi punkt wyjścia do dalszych prac nad wdrożeniem metody do codziennej praktyki. Należy zatem stwierdzić, iż Doktorant dowiódł postawionych obu tez oraz zrealizował założone cele szczegółowe i ogólny pracy doktorskiej.

Podsumowując, pomimo dostrzeżonych mankamentów edycyjno-redakcyjnych (nie merytorycznych) uważam, że przedstawiona rozprawa mgr inż. Pawła Lipowicza spełnia wymagania zawarte w regulujących kwestie przeprowadzania przewodów doktorskich dokumentach (Dz. U. 2018 poz. 1668, art. 186, 187 Ustawa z dnia 20 lipca 2018, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) i wnoszę o jej dalsze procedowanie, czyli dopuszczenie rozprawy doktorskiej pana magistra inżyniera Pawła Lipowicza do publicznej obrony.

Gdańsk, 12.02.2026



dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek,

prof. PG