

Dr hab. inż. Joanna Jaworek-Korjakowska, prof. AGH
AGH w Krakowie, Wydział EAIIB
Centrum Doskonałości Sztucznej Inteligencji AGH
jaworek@agh.edu.pl

Kraków, 24.04.2025 r.

Recenzja
Rozprawy Doktorskiej
mgr Adriany Borowej
pt.: Deep Learning Techniques For Accelerating Microscopy Image Analysis

Dziedzina nauk: inżynieryjno-techniczna,
Dyscyplina: Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

Niniejszą recenzję przygotowano na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Uniwersytetu Jagiellońskiego nr 17/11/2024 z dn. 21.11.2024.

Recenzowana praca powstawała pod kierunkiem naukowym prof. dr hab. Jacka Tabora oraz dra hab. Bartosza Zielińskiego, prof. UJ.

1. Cel i teza rozprawy

Rozprawa doktorska koncentruje się na zastosowaniu metod głębokiego uczenia do analizy obrazów mikroskopii świetlnej i fluorescencyjnej w diagnostyce biomedycznej. Tematyka pracy dotyczy jednego z najdynamiczniej rozwijających się obszarów współczesnej nauki i technologii — automatyzacji analizy obrazów biomedycznych przy użyciu sztucznej inteligencji. Jest to zagadnienie bardzo istotne praktycznie, ponieważ rosnąca liczba danych obrazowych generowanych w klinikach, laboratoriach i w badaniach naukowych wymaga nowoczesnych, skalowalnych i zautomatyzowanych metod analizy. Tradycyjne podejścia, oparte na ręcznym oznaczaniu i interpretacji obrazów, stają się niewystarczające w obliczu rosnących potrzeb diagnostycznych, badawczych i terapeutycznych.

W ramach pracy Doktorantka przedstawiła nowatorskie podejścia, takie jak multi-MIL do identyfikacji gatunków bakterii w polikulturach oraz SSMIL do klasyfikacji aktywności komórek mikrogleju. Zaprezentowane metody znacząco usprawniają proces diagnostyki, skracając czas analizy, zmniejszając zapotrzebowanie na ręczną adnotację i zwiększając wydajność przetwarzania danych. Praca podkreśla również wagę wyjaśnialności modeli uczenia

maszynowego, co jest kluczowe dla akceptacji takich rozwiązań w środowisku medycznym oraz dla budowania zaufania między systemem a użytkownikiem.

Istotnym elementem rozprawy jest jej wdrożeniowy charakter – doktorat realizowano we współpracy z firmą Ardigen SA w ramach programu “Doktorat Wdrożeniowy”. Wyniki badań zostały skutecznie przeniesione do przemysłu, co zaowocowało rozwojem usług i produktów firmy, prezentacją wyników na pięciu wydarzeniach branżowych, nawiązaniem współpracy z renomowanymi ośrodkami badawczymi i firmami farmaceutycznymi. Dodatkowym dowodem praktyczności i innowacyjności pracy jest złożenie wniosku patentowego do Europejskiego Urzędu Patentowego.

Rozprawa oparta jest na czterech publikacjach, które stanowią istotny wkład naukowy doktorantki. Dwie z nich zostały zaprezentowane na konferencjach klasy A według rankingu CORE, a dwie opublikowano w renomowanych czasopismach o wysokim współczynniku Impact Factor (4,4 – 7,7). We wszystkich tych pracach doktorantka figuruje jako pierwsza autorka, co świadczy o jej wiodącym udziale w koncepcji, realizacji oraz opracowaniu wyników badań. Powyższe prace zostaną szczegółowo omówione w dalszej części recenzji.

Podsumowując, cel pracy, która została przedstawiona na str. 9 można uznać za nadzwyczaj trafny i istotny z punktu widzenia zarówno naukowego jak też w aspekcie zastosowań proponowanego rozwiązania w praktyce wdrożeniowej.

Doktorantka wskazała, że celem rozprawy było: opracowanie i zaprezentowanie zaawansowanych metod głębokiego uczenia przeznaczonych do analizy obrazów mikroskopowych.

Proponowane podejścia realizuje **dwa kluczowe cele: znaczące skrócenie czasu niezbędnego do przeprowadzenia klasyfikacji i diagnozy** oraz **obniżenie kosztów związanych z tymi procedurami**. Opisane rozwiązania zostały szczegółowo przedstawione w czterech publikacjach naukowych, które stanowią podstawę merytoryczną niniejszej pracy.

[I] Adriana Borowa, Dawid Rymarczyk, Dorota Ochońska, Agnieszka Sroka-Oleksiak, Monika Brzychczy-Włoch, Bartosz Zieliński, „Identifying Bacteria Species on Microscopic Polyculture Images Using Deep Learning”, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol. 27(1), s. 121–130, 2023. IF 7,7, **140 punktów MNiSW**.

[II] Adriana Borowa, Dawid Rymarczyk, Dorota Ochońska, Monika Brzychczy-Włoch, Bartosz Zieliński, „Deep Learning Classification of Bacteria Clones Explained by Persistence Homology”, *2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, s. 1–8, 2021. CORE 2021 A, **140 punktów MNiSW**.

[III] Adriana Borowa, Szczepan Kruczek, Jacek Tabor, Bartosz Zieliński, „Weakly-supervised Cell Classification for Effective High Content Screening”, *International Conference on Computational Science (ICCS)*, s. 318–330, 2022. CORE 2021 A, **140 punktów MNiSW**.

[IV] Adriana Borowa, Dawid Rymarczyk, Marek Żyła, Maciej Kańduła, Ana Sánchez-Fernández, Krzysztof Rataj, Łukasz Struski, Jacek Tabor, Bartosz Zieliński, „Decoding Phenotypic Screening: A Comparative Analysis of Image Representations”, *Computational and Structural Biotechnology Journal*, Vol. 23, s. 1181–1188, 2024. IF 4,4, **100 punktów MNiSW**.

Suma punktów MNiSW: 520 punktów

Suma IF(dla publikacji w czasopismach):12,1

Wkład naukowy p. mgr Adriany Borowej obejmuje następujące elementy, które zostały zaproponowane, opracowane i zaimplementowane:

- Wprowadzenie metody multi-MIL umożliwiającej identyfikację gatunków bakterii na obrazach polikultur [I].
- Adaptację metod głębokiego uczenia do klasyfikacji klonów bakterii, wzbogaconą o mechanizmy wyjaśniania decyzji modelu w trybie post-hoc [II].
- Opracowanie metody słabo nadzorowanego uczenia wieloinstancyjnego (weakly-supervised MIL) do generowania reprezentacji obrazów w kontekście wysokoprzepustowego screeningu komórkowego (High Content Screening) [III].
- Wprowadzenie zasad oceny reprezentacji generowanych na podstawie obrazów mikroskopii fluorescencyjnej oraz zestawu rekomendacji dotyczących: (1) wyboru najlepszych metod głębokiego uczenia dla tego typu obrazów w sytuacji, w których warto uzupełniać dane o cechy zdefiniowane przez ekspertów oraz wpływu liczby źródeł danych na wyniki analizy oraz efektów batchowych [IV].

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że cele naukowe rozprawy doktorskiej została potwierdzona.

Warto podkreślić, że Doktorantka prowadziła badania w niezwykle aktualnym obszarze naukowym dotyczącym zastosowania metod głębokiego uczenia w analizie obrazów mikroskopowych, w szczególności mikroskopii świetlnej i fluorescencyjnej. Tematyka ta ma duże znaczenie biomedyczne, gdyż umożliwia automatyzację i przyspieszenie analizy obrazów komórkowych, co bezpośrednio wpływa na efektywność diagnostyki, badania procesów biologicznych oraz odkrywanie nowych terapii.

Za najważniejsze osiągnięcia z perspektywy biomedycznej uważam:

- opracowanie metody identyfikacji gatunków bakterii na obrazach bez konieczności izolacji monokultur, co znacząco skraca czas diagnostyki mikrobiologicznej,

- rozwój metod klasyfikacji aktywnych i nieaktywnych komórek mikrogleju w obrazach fluorescencyjnych, istotnych dla badań nad procesami neurozapalnymi,
- stworzenie systematycznych ram oceny jakości reprezentacji obrazów komórkowych, wspierających bardziej precyzyjną analizę fenotypową w badaniach biologicznych i farmaceutycznych.

Oceniana rozprawa doktorska ma charakter interdyscyplinarny, a jej istotny wkład obejmuje zarówno dyscyplinę informatyka techniczna i telekomunikacja (ITiT), jak i inżynierię biomedyczną (IB). Praca integruje zaawansowane techniki głębokiego uczenia, analizy danych oraz przetwarzania obrazów (w ramach ITiT) z zastosowaniami w diagnostyce biomedycznej oraz biologii komórkowej (w ramach IB), co świadczy o jej dużej wartości zarówno dla rozwoju metod sztucznej inteligencji, jak i dla praktyki klinicznej i badań biologicznych.

Podsumowując, rozprawa stanowi znaczący wkład w rozwój metod głębokiego uczenia w analizie obrazów biomedycznych, oferując jednocześnie wartościowe i praktyczne rozwiązania, które skutecznie zostały przeniesione do przemysłu, potwierdzając zarówno wysoką wartość naukową, jak i praktyczną realizowanych badań. Rozprawa doktorska koncentruje się na zastosowaniu metod głębokiego uczenia do analizy obrazów mikroskopii świetlnej i fluorescencyjnej w diagnostyce biomedycznej. Praca przedstawia nowatorskie podejścia, takie jak multi-MIL do identyfikacji gatunków bakterii oraz SSMIL do klasyfikacji komórek mikrogleju, znacząco usprawniając proces diagnostyki przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów i czasu analizy. Szczególny nacisk położono na wyjaśnialność modeli, co zwiększa ich użyteczność w środowisku klinicznym. Istotnym aspektem rozprawy jest także jej wdrożeniowy charakter – wyniki badań zostały efektywnie przeniesione do przemysłu dzięki współpracy z firmą Ardigen SA, co zaowocowało rozwojem produktów, rozszerzeniem bazy klientów oraz zgłoszeniem patentu. Wysoka jakość naukowa pracy potwierdzona jest czterema publikacjami, w tym w czasopiśmie o wysokim Impact Factor oraz na prestiżowych konferencjach.

2. Przegląd treści rozprawy

Tekst rozprawy liczy 41 stron wprowadzenia oraz załączone 4 publikacje stanowiące wkład merytoryczny. Praca składa się z pięciu rozdziałów, listy publikacji oraz bibliografii.

Rozprawa posiada klarowną i logicznie zaplanowaną strukturę. W pierwszym rozdziale przedstawiono wprowadzenie do tematyki pracy, sformułowano cel rozprawy oraz zaprezentowano listę publikacji naukowych, które stanowią merytoryczny wkład do pracy. Rozdział ten zawiera także ogólną charakterystykę problematyki badawczej oraz uzasadnienie wyboru tematu, wskazując na jego wysoką aktualność i znaczenie praktyczne.

W drugim rozdziale szczegółowo opisano zakres badań prowadzonych w ramach rozprawy. Wprowadzono czytelnika w charakterystykę danych biomedycznych wykorzystywanych w pracy, obejmujących obrazy pochodzące z mikroskopii świetlnej oraz fluorescencyjnej. Opisano źródła danych, ich specyfikę oraz znaczenie dla rozwoju metod analitycznych opartych na głębokim uczeniu.

Trzeci rozdział poświęcony został omówieniu głównych osiągnięć naukowych doktorantki. Przedstawiono tutaj szczegółowy opis wkładu wynikającego z czterech publikacji stanowiących podstawę rozprawy. W pierwszej części zaprezentowano badania nad analizą obrazów bakterii z mikroskopii świetlnej, obejmujące opracowanie metody identyfikacji gatunków bakterii na obrazach polikultur przy użyciu głębokiego uczenia oraz rozwój metod klasyfikacji klonów bakterii z wykorzystaniem technik wyjaśnialności modeli. Następnie przedstawiono badania dotyczące analizy obrazów komórek uzyskanych w mikroskopii fluorescencyjnej, w tym opracowanie słabo nadzorowanej metody klasyfikacji aktywności komórek mikrogleju oraz zaprojektowanie ram oceny jakości reprezentacji obrazów, wraz z rekomendacjami dotyczącymi optymalnych metod głębokiego uczenia i integracji cech eksperckich.

Czwarty rozdział prezentuje profil naukowy doktorantki. Przedstawiono w nim listę publikacji niezwiązanych bezpośrednio z rozprawą, udział w projektach badawczych i grantach, informacje o współpracy krajowej i międzynarodowej, aktywność w promocji nauki oraz doświadczenie zawodowe, ze szczególnym uwzględnieniem pracy w przemyśle.

W piątym, końcowym rozdziale, zaprezentowano podsumowanie wyników badań, najważniejsze wnioski płynące z pracy oraz zarysowano możliwe kierunki dalszego rozwoju prowadzonych badań w dziedzinie analizy obrazów biomedycznych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Przedstawiono również udział w aktualnych grantach i konsorcjach.

Rozprawę zamyka lista publikacji stanowiących podstawę pracy doktorskiej oraz bibliografia.

3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Ze względu na wysoki poziom merytoryczny rozprawy, jakość przedstawionych publikacji, znaczące osiągnięcia naukowe oraz zaangażowanie doktorantki w realizację projektów badawczych i wdrożeniowych, **nie zgłaszam uwag krytycznych** do pracy.

Ewentualne kwestie dyskusyjne, wynikające z charakteru badań lub przyjętych założeń, mają marginalne znaczenie i nie wpływają na ocenę całości rozprawy. Mogą one zostać szczegółowo omówione podczas publicznej obrony pracy doktorskiej.

4. Ocena formalna

Od strony formalnej oceniana rozprawa doktorska nie budzi żadnych zastrzeżeń. Praca została napisana poprawnym i płynnym językiem angielskim, co czyni ją wyróżniającą się na tle prac doktorskich w tej dziedzinie.

Szczególnie należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką jakość przygotowanych rysunków, schematów oraz przejrzystość analiz wyników, które nie tylko uzupełniają treść publikacji, ale również ułatwiają zrozumienie przedstawionych badań i wniosków. Całość prezentuje się na najwyższym poziomie zarówno pod względem merytorycznym, jak i edytorskim.

W związku z wysoką jakością wykonania pracy, nie zgłaszam uwag dotyczących drobnych błędów technicznych lub literówek, które przy takiej objętości tekstu mogą się sporadycznie pojawić, lecz nie wpływają w żaden sposób na ocenę rozprawy.

5. Osiągnięcia

Osiągnięcia doktorantki świadczą o jej wysokiej aktywności badawczej, projektowej i wdrożeniowej, zarówno na poziomie krajowym, jak i międzynarodowym.

W zakresie realizacji projektów badawczych doktorantka była kierownikiem grantu POB DigiWorld na Uniwersytecie Jagiellońskim (2021), dotyczącego zastosowania samonadzorowanego uczenia maszynowego w dochodzeniach epidemiologicznych. Pełniła także funkcję lidera zespołu badawczego w projekcie Fast Track NCBR (2019–2022), uczestniczyła w drugim grantie POB DigiWorld. Doktorantka aktywnie współpracowała z wieloma prestiżowymi ośrodkami badawczymi i przemysłowymi na arenie międzynarodowej. Efektem tych współprac były znaczące publikacje w renomowanych czasopiśmie. Jest współautorką pracy w ramach konsorcjum JUMP-CP, dotyczącej największego obecnie zbioru danych Cell Painting, oraz liderem zespołu, który stworzył i wdrożył aplikację internetową JUMP-CP Explorer.

Na poziomie krajowym doktorantka współpracowała z prof. Moniką Brzychczy. Efektem tych badań są wysoko oceniane publikacje oraz zgłoszenie wniosku patentowego do Europejskiego Urzędu Patentowego. W zakresie pracy zawodowej doktorantka realizowała swoje badania w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy, współpracując z firmą Ardigen SA.

6. Podsumowanie

Zakres i poziom naukowy uzyskanych wyników badawczych odpowiadają w pełni ustawowym kryteriom stawianym rozprawom doktorskim w Ustawie – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. Z 2023 r. poz. 742, 1088) i zwyczajowym wymaganiom, stawianym rozprawom na stopień doktora. Wniosuję zatem do Wysokiej Komisji powołanej przez Radę Naukową Dyscypliny Informatyki Technicznej i Telekomunikacji Uniwersytetu Jagiellońskiego o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autorki, mgr Adriany Borowej do publicznej obrony.

Dodatkowo, mając na uwadze wysoki poziom naukowy rozprawy, znaczący dorobek publikacyjny doktorantki oraz jej osiągnięcia projektowe i wdrożeniowe, wniosuję o przyznanie pracy doktorskiej wyróżnienia.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jana' followed by a stylized flourish.