

dr hab. inż. Robert Salat, prof. PK
Katedra Inżynierii Elektrycznej
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
Tel. 12 628 26 14, e-mail: robert.salat@pk.edu.pl

Kraków, 20.06.2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pani mgr inż. **Kamili Bialek**, pt.:

„Strategie przygotowania obrazów pisma odręcznego na potrzeby rozpoznawania choroby Parkinsona z wykorzystaniem sieci konwolucyjnej”,

wykonanej na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej

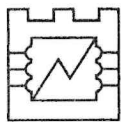
im. Jarosława Dąbrowskiego

Promotor: dr hab. inż. Jacek Jakubowski

Recenzję wykonano na podstawie uchwały nr 41/RDN AEEiTK/2025, podjętej przez Radę
Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego

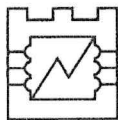
z dnia 13 marca 2025 r.



1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Choroba Parkinsona to przewlekłe, postępujące schorzenie neurodegeneracyjne, które dotyka głównie osób po 60. roku życia i znacząco wpływa na jakość życia pacjentów oraz ich rodzin. Kluczowym problemem pozostaje rozpoznanie choroby na wczesnym etapie, gdy uszkodzenia w układzie dopaminergicznym już występują, ale objawy są jeszcze niespecyficzne lub łagodne. Wczesna diagnoza ma ogromne znaczenie, ponieważ umożliwia szybsze wdrożenie leczenia i rehabilitacji, które mogą spowolnić postęp choroby i poprawić funkcjonowanie chorego. W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój metod opartych na sztucznej inteligencji, w szczególności sieci neuronowych, w diagnostyce choroby Parkinsona. Sieci neuronowe, w tym głębokie modele uczące się (ang. *deep learning*), wykorzystywane są do analizy złożonych danych klinicznych, takich jak obrazy mózgu, sygnały głosu, ruchu, czy pisma, w celu wczesnego i precyzyjnego rozpoznania tej choroby neurodegeneracyjnej. Rozpoznawanie choroby na podstawie pisma i rysunków (np. spirali) również okazało się skuteczne przy wykorzystaniu sieci neuronowych. Naukowcy zastosowali analizę grafomotoryczną połączoną z klasyfikacją przez sieć neuronową, osiągając dokładność powyżej 80%. W literaturze podkreśla się, że zaletą tego typu metod jest ich nieinwazyjność, łatwość stosowania oraz możliwość wykorzystania w zdalnych systemach monitorowania stanu pacjenta. W odróżnieniu od badań obrazowych, czy biochemicznych, analiza pisma może być realizowana w warunkach ambulatoryjnych lub domowych, co zwiększa jej dostępność. Dodatkowo, dzięki cyfrowemu zapisowi danych, możliwe jest pełne obiektywizowanie oceny – niezależnie od doświadczenia osoby analizującej próbkę. Mimo obiecujących wyników, wyzwaniem pozostają ograniczony dostęp do dużych, zrównoważonych zbiorów danych oraz potrzeba tworzenia modeli bardziej przejrzystych i łatwiejszych do zinterpretowania przez klinicystów. Kolejnym istotnym ograniczeniem jest brak standaryzacji próbek pisma i narzędzi używanych do ich rejestracji. W różnych badaniach stosuje się odmienne zadania – pisanie zdań, rysowanie spirali, liter lub cyfr oraz różne urządzenia, takie jak skanery lub tablety graficzne, co znacznie utrudnia porównywanie wyników oraz opracowanie spójnych protokołów badawczych. Problemem jest również znaczna zmienność osobnicza w sposobie pisania. Styl pisma, wielkość liter, siła nacisku, czy tempo pisania są cechami bardzo indywidualnymi - nawet w populacji osób zdrowych.

Podsumowując, zastosowanie sieci neuronowych w diagnostyce choroby Parkinsona daje bardzo obiecujące rezultaty w zakresie wczesnego wykrywania i różnicowania tej choroby.



Dotychczasowe badania pokazują, że technologia ta może znacząco wesprzeć praktykę kliniczną, szczególnie w zakresie analizy danych trudnych do interpretacji klasycznymi metodami, jednak przed jej pełną implementacją konieczne są dalsze badania kliniczne oraz standaryzacja narzędzi i procedur. Bardzo obszerny zakres tematyczny rozprawy oraz motywacja do podjęcia tak trudnego tematu zasługują na duże uznanie.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

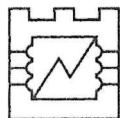
Recenzowana rozprawa doktorska napisana w postaci monografii obejmuje 100 stron i składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści oraz 10 rozdziałów. Poszczególne rozdziały zawierają wstęp, wyniki badań, podsumowanie, wnioski końcowe, wykaz literatury zawierający 113 pozycji, w tym 4 pozycje współautorskie Autorki rozprawy. Na końcu rozprawy zamieszczono dwa załączniki zawierające informacje kliniczne i demograficzne na temat uczestników badania oraz opis autorskiego oprogramowania do rejestracji pisma. Przedstawione w rozprawie wyodrębnione i ponumerowane rozdziały to:

Rozdział 1. Wstęp

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w tematykę rozprawy oraz przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie problematyki wsparcia diagnostyki choroby Parkinsona. Doktorantka na początku rozdziału przedstawiła opis choroby Parkinsona i jej główne objawy oraz statystyki diagnozowania choroby. Następnie dokonała szerokiego przeglądu literaturowego odnośnie tematyki rozprawy. Rozdział kończy się przedstawieniem celu i tez rozprawy oraz szczegółowym omówieniem struktury rozprawy.

Rozdział 2. Rozpoznawanie choroby Parkinsona na podstawie próbek pisma - stan zagadnienia

W rozdziale 2 przedstawiono analizę literatury dotyczącej rozpoznawania choroby Parkinsona na podstawie pisma odręcznego. Przedstawiono głęboką analizę pod kątem stosowanych narzędzi, omówiono bazę danych pacjentów wraz opisem wzorców pisma. Rozdział kończy się na szerokim omówieniu konwolucyjnych sieci neuronowych wykorzystanych do trenowania i testowania na podstawie pisma pochodzącego z tej bazy danych wraz z przedstawionymi wynikami w tabelach 2.3 do 2.6.



Rozdział 3. Konwolucyjne sieci neuronowe – charakterystyka narzędzia

W rozdziale 3 przedstawiono i scharakteryzowano konwolucyjne sieci neuronowe użyte w badaniach. Opisano dokładnie głębokie sieci neuronowe oraz ich metody uczenia skupiając się na architekturze, operacji splotu, nieliniowej funkcji aktywacji, warstwie w pełni połączonej a kończąc na klasyfikatorze neuronowym typu softmax. Przedstawiono również zagadnienia związane z augmentacją danych i ich wpływem na wynik klasyfikacji. Rozdział kończy się omówieniem metody *transfer learningu* jako alternatywnej metody do augmentacji danych.

Rozdział 4. Rejestracja pisma odręcznego

Rozdział 4 zawiera krótkie omówienie materiału badawczego dostarczonego przez zespół medyczny pracujący w Klinice i Katedrze Neurologii Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. Rozdział kończy się dość szczegółowym omówieniem tabletu graficznego firmy WACOM jako narzędzia do rejestracji pisma odręcznego.

Rozdział 5 Wstępne przetwarzanie danych

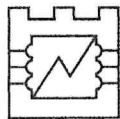
Rozdział piąty jest pierwszym rozdziałem, w którym Doktorantka przeprowadza badania na zbiorze danych pozyskanych w wyniku rejestracji pisma za pomocą tabletu graficznego. W rozdziale tym Doktorantka skupiła się na pokazaniu metod podziału całych rejestracji na poszczególne zdania, słowa oraz generacji obrazów na podstawie zarejestrowanych danych. W końcowej części rozdziału Doktorantka przedstawiła na przykładach wpływ rozmiaru znacznika, skali kolorystycznej, jak i uwzględnienia siły nacisku na generację obrazu wykorzystanego do klasyfikacji.

Rozdział 6. Organizacja badań eksperymentalnych

Rozdział szósty jest teoretycznym rozdziałem rozprawy, w którym Doktorantka skupiła się na przedstawieniu miar jakości klasyfikacji. Szczegółowo omówione zostały pojęcia walidacji krzyżowej, dokładności, czułości, specyficzności, precyzji oraz krzywej ROC.

Rozdział 7. Rozpoznanie choroby Parkinsona na podstawie pojedynczego zdania

W rozdziale 7 Doktorantka przedstawiła klasyfikację binarną osób chorych na chorobę Parkinsona i osób zdrowych na podstawie pisma odręcznego przedstawiającego pojedyncze zdanie. Rozdział zaczyna się od metodyki badań, gdzie omówiona jest struktura sieci neuronowej,



przygotowanie danych, ekstrakcja cech, dostrajanie oraz uczenie sieci. Następnie Doktorantka przedstawiła wyniki rozpoznania choroby Parkinsona na podstawie pierwszego zdania wykorzystując wektory cech wyodrębnione z różnych warstw sieci AlexNet. Wyniki klasyfikacji przedstawione zostały w tabeli 7.3 i graficznie na rysunku 7.5. Rozdział kończy się na omówieniu wyników klasyfikacji dla każdego z 5 zdań, które zamieszczono w tabeli 7.4 i 7.5 oraz macierzy błędów na rysunku 7.6, 7.10, 7.11 i 7.12.

Rozdział 8. Rozpoznanie choroby Parkinsona na podstawie sekwencji zdania

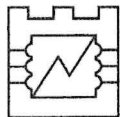
W rozdziale 8 Doktorantka przedstawiła klasyfikację binarną osób chorych na chorobę Parkinsona i osób zdrowych na podstawie pisma odręcznego przedstawiającego sekwencję zdań. Rozdział 8, podobnie jak rozdział 7, zaczyna się od metodyki badań, gdzie omówione jest strategia decyzyjna, augmentacja pisma odręcznego oraz uczenie sieci. Następnie przedstawione są wyniki dla różnych technik klasyfikacji sekwencji zdań, zarówno z zastosowaniem algorytmu integrowania decyzji, jak i bez. Wyniki klasyfikacji przedstawione zostały w tabelach 8.2, 8.3, 8.4 i graficznie - na rysunkach 8.3, 8.5, 8.6 i 8.7. Rozdział kończy się na omówieniu wzrostu rozpoznawalności obu grup, co zdecydowanie poprawiło wyniki rozpoznania choroby Parkinsona w stosunku do wykorzystania zdania pojedynczego.

Rozdział 9. Rozpoznanie choroby Parkinsona na podstawie słów z sekwencji zdania

Rozdział 9 jest ostatnim rozdziałem zawierającym opis badań, w którym Doktorantka wykazała poprawność tezy mówiącej, że dalszą poprawę klasyfikacji można uzyskać poprzez podział sekwencji zdań na sekwencję słów na podstawie próbek pisma odręcznego. Rozdział, podobnie jak rozdziały 7 i 8, zaczyna się od metodyki badań, gdzie omówione jest przygotowanie danych oraz uczenie sieci. Wyniki zestawiono w tabelach 9.2 do 9.6 i na rysunkach 9.5 do 9.8. Wyniki przedstawione za pomocą wskaźników jakości pokazały dalszą poprawę dokładności klasyfikacji. Rozdział kończy się analizą tych wyników pod względem konkretnych wskaźników.

Rozdział 10. Prace optymalizacyjne w zakresie doboru klasyfikatora

Rozdział 10 jest rozdziałem, w którym Doktorantka skupiła się na sprawdzeniu, czy zamrażanie poszczególnych warstw sieci neuronowej ma wpływ na wynik klasyfikacji. Rozdział zaczyna się od doboru głębokości dostrojenia sieci AlexNet a kończy na przedstawieniu wyników dla innych głębokich sieci neuronowych dostępnych w pakiecie Matlab. Wyniki pokazują, że można poprawić dokładność stosując bardziej zaawansowane głębokie sieci neuronowe.



Ostateczne wyniki przedstawiono w tabelach 10.1 do 10.4 i na rysunkach 10.5 i 10.6 przedstawiających macierze błędów.

Rozdział 11. Podsumowanie i wnioski końcowe

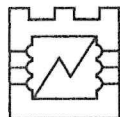
Rozdział 11 zawiera podsumowanie pracy, końcowe wnioski oraz omówienie kluczowych rezultatów uzyskanych w ramach rozprawy. Przedstawione wyniki potwierdzają trafność zastosowanych podejść badawczych. Na zakończenie rozdziału wskazano możliwe kierunki kontynuacji badań oraz warunki ich realizacji.

Podsumowując, analiza treści poszczególnych rozdziałów recenzowanej rozprawy pozwala stwierdzić, że ma ona charakter zarówno teoretyczny, jak i praktyczny, a zaprezentowane wyniki badań są na tyle obszerne i spójne, że umożliwiają realizację głównych celów pracy oraz potwierdzenie postawionych tez. Rozprawa została napisana poprawnym językiem, a jej struktura i układ cechują się przejrzystością oraz logiczną spójnością.

3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Badania przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej miały innowacyjny charakter. Założone przez Doktorantkę cele zostały konsekwentnie realizowane na kolejnych etapach pracy. Wśród najistotniejszych rezultatów, na które sama Autorka zwraca uwagę, należy wymienić:

1. Adaptacja tabletu graficznego do potrzeb prowadzenia badań diagnostycznych u pacjentów z chorobą Parkinsona.
2. Stworzenie dedykowanego oprogramowania umożliwiającego obsługę urządzenia oraz rejestrację danych wejściowych.
3. Opracowanie algorytmów służących do analizy i przetwarzania danych pozyskanych za pomocą tabletu graficznego.
4. Sformułowanie oryginalnej koncepcji badań opartych na wykorzystaniu konwolucyjnych sieci neuronowych w celu zwiększenia skuteczności klasyfikacji choroby Parkinsona na podstawie analizy próbek pisma – z założeniem poprawy względem wyników dotychczas raportowanych w literaturze.



5. Zrealizowanie serii eksperymentów z użyciem rzeczywistych danych pochodzących z badań klinicznych, które potwierdziły trafność postawionych w rozprawie założeń.

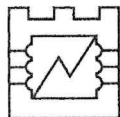
Ostateczne wyniki, które zostały uzyskane, potwierdziły tezy zawarte w pracy, wskazujące, że użycie sekwencji obrazów zdań daje lepsze wyniki niż obrazy pojedynczych zdań oraz, że istnieje jeszcze możliwość poprawy na drodze podziału sekwencji zdań na sekwencję słów. Wyniki potwierdzające tezę pierwszą pozwoliły uzyskać poprawę dokładności aż o 12% - poprawa dotyczyła również wzrostu wartości precyzji odpowiednio do poziomu 86%, czułości do 79% a specyficzności do 83%. Wyniki potwierdzające tezę drugą pokazały poprawę wszystkich wskaźników, gdzie dokładność wzrosła w najlepszym przypadku do poziomu 89,6%, precyzji do 88%, czułość do 96% a specyficzność do 83%.

Podsumowując, wyniki, które Doktorantka uzyskała dla wszystkich badanych przypadków na poziomie 81% i wyższym, można uznać, że są na światowym poziomie.

4. Uwagi do rozprawy

Uwagi o charakterze ogólnym, które są zarówno pytaniami do Doktoranta, komentarzami, jak również uwagami, które wymagają wyjaśnienia. Kolejność uwag nie jest tożsama z ich pojawianiem się w rozprawie.

1. W środowisku MATLAB sieci CNN uczone są z wykorzystaniem algorytmów opartych na spadku gradientu, co może prowadzić do zatrzymania się w minimach lokalnych. Jedną z metod przeciwdziałania temu zjawisku jest wielokrotne trenowanie modelu przy różnych inicjalizacjach wag i wybór najlepszego rozwiązania. Czy w trakcie pracy podejmowano próby ponownego trenowania sieci w celu sprawdzenia, czy możliwe jest osiągnięcie jeszcze lepszych wyników?
2. Nie podano szczegółowych informacji dotyczących rodzaju zastosowanej sieci SVM, ani typu klasyfikatora użytego w badaniach. Tymczasem w środowisku Matlab dostępnych jest wiele wariantów sieci SVM, które mogą generować znacząco odmienne wyniki w zależności od konfiguracji.
3. W rozdziale 10 porównano różne rodzaje głębokich sieci neuronowych dostępnych w Matlabie zastosowanych w problemie rozpoznania choroby Parkinsona. Brak jest informacji odnośnie czasów trenowania, jak również informacji, czy obliczenia były wykonywane na procesorze, czy karcie graficznej, których wybór Matlab umożliwia.

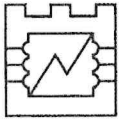


4. W rozdziale 10 brak również informacji, na jakim zbiorze danych były uczone głębokie sieci neuronowe, tj. pojedynczego zdania, sekwencji zdań, czy sekwencji słów.
5. Rozmiar obrazów ma duży wpływ na działanie sieci CNN, jaka była skala oryginalnych zdjęć i czy były przeskalowane do różnych typów sieci CNN?
6. Czy były dokonywane próby zbudowania własnej sieci CNN do problemu klasyfikacji choroby Parkinsona? Łatwość budowania struktur oraz uczenia w Matlabie pod konkretne zadanie nie powinny stanowić dużego wyzwania. Proszę o komentarz do tej uwagi.
7. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego nie wzięto pod uwagę dużych możliwości otrzymanych informacji z tabletu, tj. siły nacisku, kąta ułożenia pióra, dynamiki pisanie. Można to było uwzględnić jako dodatkowe informacje dla sieci neuronowej, np. SVM.
8. Proszę o wyjaśnienie sytuacji, jak na rozpoznawanie choroby Parkinsona na podstawie sekwencji zdań miałby wpływ wyboru tylko zdań 3, 4 i 5.
9. Według informacji zawartej w rozdziale 8.2.2, użyto augmentacji zdania 1. Czy użycie innych zdań, tj. 2, 3, 4, lub 5 do augmentacji poprawiłoby wyniki?

5. Uwagi redakcyjne

Pragnę zaznaczyć, że poniższe uwagi redakcyjne nie mają istotnego wpływu na ocenę merytoryczną pracy i nie komplikują jej odbioru.

1. Praca napisana jest bardzo poprawnym językiem polskim, trudno znaleźć jakiegokolwiek błędy literowe. Jedyne w kilku miejscach pojawiają się pojedyncze błędy literowe lub źle dobrane słowa (np. strona 79, pierwsze zdanie).
2. Pojawiają się sprzeczności w użyciu wersji Matlaba - w jednym miejscu pojawia się informacja, że pracowano na wersji 2021b, a w innym, że na 2018b.
3. Brak konsekwencji w przedstawianiu wyników w tabelach – w niektórych wyniki są w procentach, a w innych jako liczba zapisana po przecinku.
4. Brak informacji, o czym w tabelach informuje liczba po znaku +/- . Rozumiem, że jest to odchylenie standardowe.
5. Brak konsekwencji opisu literatury – w niektórych pozycjach jest zapis dużą czcionką, a w innych, „Jak w zdaniu”, numery stron raz tylko pierwsza strona raz cały zakres.



4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. **Kamili Bialek** dotyczy bardzo aktualnego zagadnienia naukowego jakim jest rozpoznawanie choroby Parkinsona na podstawie obrazów pisma odręcznego za pomocą głębokich sieci neuronowych.

Cele założone w pracy były konsekwentnie realizowane i w mojej ocenie **zostały osiągnięte**.

Zamieszczone uwagi w niniejszej recenzji nie mają istotnego wpływu na moją **pozytywną ocenę**. Zatem stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. **Kamili Bialek** zatytułowana *„Strategie przygotowania obrazów pisma odręcznego na potrzeby rozpoznawania choroby Parkinsona z wykorzystaniem sieci konwolucyjnej”*, stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, a spójnie i kompleksowo przedstawiony sposób rozwiązania problemów dowodzi umiejętności prowadzenia prac naukowych.

Uważam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. (Dz. U. 2023 poz. 742 - tekst ujednolicony z dnia 08.03.2023r.).

W związku z tym, przedkładam Radzie Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego wniosek o przyjęcie i dopuszczenie recenzowanej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Robert Setał