

Częstochowa, dn. 14 września 2020 r.

dr hab. inż. Rafał Scherer, prof. uczelni  
Katedra Inteligentnych Systemów Informatycznych  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Politechnika Częstochowska  
al. Armii Krajowej 36  
42-200 Częstochowa

### Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Rutkowskiego, pt.:  
„Sztuczne sieci neuronowe w analizie sygnałów biomedycznych”.  
Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Patan, prof. UZ  
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Artur Gramacki, prof. UZ

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Uniwersytetu Zielonogórskiego, prof. dr hab. inż. Józefa Korbicza, z dnia 7.07.2020 r.

## 1. Charakterystyka tematu, celu i tezy badawczej rozprawy

Bezinwazyczny pomiar fal mózgowych wynikających z aktywności mózgu jest bardzo dobrą metodą diagnozy epilepsji, zaburzeń snu i innych chorób mózgu czy zatruc. Może też służyć do budowy interfejsów mózg-komputer, treningu mózgu czy badań konsumenckich. Doktorant w pracy skupił się na diagnostyce epilepsji gdyż metody znane w literaturze nie osiągnęły jeszcze maksymalnej jakości jej diagnozy. Doktorant postanowił rozwiązać problem stosując rozmaite klasyfikatory wraz z różnymi metodami ekstrakcji cech i wstępnego przetwarzania sygnału oraz głębokie neuronowe sieci rekurencyjne, formułując tezę pracy „Wykorzystanie technik sztucznej inteligencji umożliwi zbudowanie wydajnego systemu wykrywania krótkotrwałych napadów padaczkowych, który znacząco polepszy jakość stawianych diagnoz w stosunku do istniejących metod”.

## 2. Zawartość rozprawy

Recenzowana praca mgra inż. Grzegorza Rutkowskiego składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii. Dokument liczy 176 stron.

Pierwszy rozdział jest krótkim wprowadzeniem do problemu diagnozy za pomocą elektroencefalogramu. Omawia problemy związane z diagnostyką, np. małą dostępność danych

EEG rejestrowanych w czasie napadu padaczki. Rozdział zawiera przegląd literatury. Dalej następuje teza pracy, zestawienie elementów nowości i krótki opis zawartości pracy.

Rozdział 2 jest wprowadzeniem do tematyki elektroencefalografii, zasady działania i historii. Autor omówił zasadę działania pomiaru fal mózgowych oraz wymienił znane typy fal mózgowych, wartości i napięcia i częstotliwości. Dużo miejsca poświęcił opisowi napadów padaczkowych i ich dokładnej klasyfikacji. Dalej autor omawia istniejące rozwiązania komputerowe służące do analizy sygnałów EEG. Wydaje się, że ta sekcja jest trochę uboga, na pewno można opisać dokładniej istniejące rozwiązania i połączyć je z przeglądem literatury z rozdziału 1. Rozdział kończy się prezentacją praktycznego problemu diagnozowania przypadków epilepsji. Zazwyczaj mamy do czynienia z możliwą diagnostyką EEG pomiędzy napadami padaczki. To zadanie jest trudne, gdyż sygnały międzynaapadowe nie mają regularnych i wyraźnych cech wskazujących na padaczkę.

Rozdział 3 omawia zgromadzony zbiór danych, który został zebrany w Szpitalu Wojewódzkim w Zielonej Górze. Zdiagnozowano 104 chorych i 71 zdrowych pacjentów, z czego utworzono zbalansowany zbiór danych po 588 sekwencji zdrowych i chorych przypadków. Zbiór zawiera przebiegi EEG w formacie gotowym do użycia w analizie komputerowej, wraz z przepisnymi orzeczeniami lekarskimi. Autor bardzo szczegółowo analizuje przebiegi w poszczególnych grupach wiekowych. Miało to na celu sprawdzenie istotności zmiennych. Przeprowadzona analiza wykazała, że wszystkie zmienne mają wpływ na diagnozę. Należy podkreślić wyjątkową dokładność i szczegółowość przygotowanych zbiorów danych i ich analizę statystyczną. W rozdziale tym również zastosowano kilka metod statystycznych do analizy danych EEG, w celu znalezienia miejsc napadów epileptycznych, jednak nie przyniosły one w pełni zadowalających efektów.

W rozdziale 4 Doktorant omawia metody ekstrakcji cech i wstępnego przetwarzania danych EEG. Przytoczył na początku problemy związane z analizą tych danych wynikające z subiektywnej oceny graficelementów przebiegów EEG, pociągająca za sobą niezgodność diagnozy dokonywanej przez poszczególnych lekarzy. W rozdziale przedstawiono przekształcenie do dziedziny częstotliwości za pomocą transformaty Fouriera, jej postaci dyskretnej oraz krótko-czasowej. Omówiono modelowanie za pomocą autoregresji. Następnie zaprezentowano transformatę falkową i algorytm poszukiwań dopasowujących. Dużą część rozdziału zajmuje obszerne omówienie nowoczesnej transformaty Stockwella. Rozdział kończy omówienie sposobów ekstrakcji cech, takich jak wartość średnia, odchylenie standardowe, mediana, dominanta, składowe energii, entropia składowych częstotliwościowych. Stosując powyższe metody uzyskano znaczącą redukcję wielkości danych. Metody te zostały użyte w rozdziale 5 do przetwarzania danych na potrzeby popularnych metod klasyfikacji.

Rozdział 5 omawia różnego rodzaju klasyfikatory. Na wstępie mamy wprowadzenie i podstawowe definicje związane z klasyfikacją. Dalej omówiono liniowy klasyfikator Fishera oraz naiwny klasyfikator Bayesa, klasyfikator  $k$ -najbliższych sąsiadów, SVM oraz sieć neuronowa typu perceptron wielowarstwowy. Dalej podano miary jakości takie jak macierz pomyłek, czułość, specyficzność, dokładność całkowitą, precyzję, krzywe ROC, współczynnik Giniego, wskaźnik AUC. Dla opisanych klasyfikatorów wykonano eksperymenty dla różnych cech wejściowych oraz transformacji danych wejściowych. Dokonano również detekcji

epilepsji w trybie online za pomocą klasyfikatora MLP. Należy podkreślić mnogość konfiguracji, gdyż każdy z klasyfikatorów miał dziewięć kombinacji cech i preprocessingu danych. Zastanawia stosunkowo wysoka dokładność klasyfikatora  $knn$  dla  $k=1$ , który w takim przypadku powinien bardzo słabo generalizować dane i mieć niską dokładność na zbiorze testowym.

Rozdział 6 prezentuje wprowadzenie i rezultaty eksperymentów związane z sieciami neuronowymi. Na początku Doktorant omawia krótką historię uczenia maszynowego, oraz przeszkody, które miały wpływ na brak rozwoju sieci neuronowych aż do ostatnich lat. Píše, że „głębokie uczenie nie jest właściwie nowym podejściem, jest znane od dekad, co najmniej od lat czterdziestych XX wieku”, a dalej „Idea głębokich sieci neuronowych powstała już na początku lat 70-tych,...”. Zapewne w pierwszym zdaniu chodziło ogólnie o sieci neuronowe. Doktorant wymienia rozliczne przykłady aplikacji uczenia maszynowego. Píše również o możliwej analizie szeregów czasowych. Cytuje tu między innymi pracę [130] X Zhang, Y LeCun *Text understanding from scratch*, 2015, co chyba jest pomyłką, gdyż praca dotyczy analizy tekstu z kodowaniem *one-hot* na poziomie znaków. Dalej Autor omawia sieci splotowe, wraz z ich podstawowymi typami warstw. Warstwa w pełni połączona (gęsta) jest rozpatrywana jakby była innym rodzajem warstwy od perceptronu wielowarstwowego MLP z podrozdziału 5.6. Jest to przecież ten sam rodzaj sieci. Dalej omawiana jest sieć U-Net. Tu nie wspomniano, że jest to sieć w pełni splotowa (*fully convolutional*) o architekturze podobnej autoenkodera, ale z połączeniami pomiędzy odpowiadającymi sobie warstwami w części kodera i dekodera (*skip connections*). Wejściem i wyjściem tej sieci jest dwuwymiarowa macierz. Wydaje się, że przytoczenie tej sieci, biorąc pod uwagę występowanie dziesiątek architektur głębokiego uczenia, jest przypadkowe. Można by jednak wykonać eksperymenty z próbą nauczenia sieci U-Net wskazywania na wyjściu na obrazie z przebiegiem EEG obszarów wskazujących na różne anomalie (podając na wejście surowy obraz przebiegu EEG).

Następnie omawiana jest jedna z nowatorskich architektur CNN, to jest AlexNET. Tutaj jest ona omawiana, tak jakby była inną architekturą niż sieci splotowe z podrozdziału 6.2. Ponadto architektury te są przedstawione, a nie zostały użyte w eksperymentach.

Podrozdział 6.3 omawia sieci rekurencyjne, ale tylko typu LSTM. Opis jest bardzo dokładny, a towarzyszy mu prezentacja algorytmów uczenia. Eksperymenty przeprowadzono w dwóch konfiguracjach klasyfikacji: sekwencja-sekwencja oraz sekwencja-etykieta, dokonano wykrywania padaczki online oraz dodano regularyzację.

Rozdział 6.4 omawia eksperymenty z siecią LSTM w konfiguracji sekwencja-sekwencja oraz sekwencja-etykieta. Wykonano próby z różnymi wielkościami meta-parametrów sieci, dobierając optymalny rozmiar struktury, będący kompromisem pomiędzy złożonością modelu, a jego dokładnością. Osiągnięto bardzo wysoką jakość klasyfikacji. Eksperymenty online przeprowadzone były za pomocą ruchomego okna dla całych sekwencji EEG. Ostatnie eksperymenty zostały przeprowadzone dla najoptymalniejszej struktury, dla której do algorytmu uczenia dodano regularyzację w postaci drop-out, co jeszcze poprawiło jakość klasyfikacji.

Ostatni, siódmy rozdział pracy to obszerne podsumowanie i wnioski.

Pracę kończy bibliografia składająca się ze stu trzydziestu trzech aktualnych pozycji.

Ogólnie, zasadnicze i oryginalne rezultaty pracy można podsumować następująco:

- Zrealizował cel rozprawy,
- Uzyskał oryginalne rezultaty naukowe dotyczące diagnostyki epilepsji,
- Dokonał ciekawego wprowadzenia do tematyki, oraz przeglądu wybranych bieżących pozycji literaturowych dotyczących tematu,
- zbudował ustrukturyzowany zbiór przebiegów EEG wraz z resamplingiem i oczyszczeniem danych.
- Zastosował metody statystyczne oraz przekształcenia do dziedziny częstotliwości do obróbki sygnału EEG,
- Zastosował klasyczne klasyfikatory oraz rekurencyjne sieci neuronowe LSTM do diagnozy epilepsji off-line i online z przebiegów EEG,

Zaprezentowany materiał pokazuje, że Doktorant zrealizował cel i wykazał tezę pracy.

### 3. Uwagi krytyczne i wskazówki dotyczące rozprawy

Praca napisana jest schludnie i przejrzysto. Praca obfituje w czytelne rysunki oraz schematy. Zbiory danych oraz wyniki eksperymentów opisane są wyjątkowo dokładnie i obszernie.

Poniżej zamieszczam kilka uwag i pytań. Uwagi te nie umniejszają wartości naukowej rozważanej rozprawy doktorskiej.

Autor używa słowa „ilość” do rzeczowników policzalnych, takich jak „cechy”, „zastosowania”, powinno być „liczba”.

Na stronie 129 pada stwierdzenie „przełomowego papieru klasyfikacyjnego ImageNet”, chyba powinno brzmieć „artykułu” lub „publikacji”.

Autor opisał sieci splotowe, ale nie ma eksperymentów z ich udziałem. Nadają się one wyśmienicie do analizy sygnałów. Zamiast splotu dwuwymiarowego używanego przy np. zdjęciach czy obrazowaniu medycznym 2D, wystarczy użyć splotu jednowymiarowego z sygnałem. Czy możliwa byłaby analiza sygnałów EEG z użyciem sieci CNN? Szkoda, że Autor nie wykonał takich eksperymentów. Podrozdział 6.3 omawia sieci rekurencyjne, ale tylko typu LSTM. Być może inne warianty jak LSTM z wizjerem (*peephole*), GRU dałyby lepsze wyniki?

Czy można by użyć istniejących w sieci Internet zbiorów danych z przebiegami EEG z epilepsją? Może istnieje możliwość połączenia stworzonego zbioru z innymi?

Rozdział 5 nazwany jest „Klasyfikacja”, ale rozdział 6 również omawia klasyfikatory. Rozdział 6 różni się brakiem cech tworzonych samodzielnie (tzw. *hand-crafted features*).

W rozprawie brak jest informacji o sposobie implementacji opisanych metod. Najprawdopodobniej większość eksperymentów było przeprowadzone z użyciem jakichś bibliotek uczenia maszynowego.

#### 4. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Grzegorz Rutkowski, w rozprawie doktorskiej pt.: „Sztuczne sieci neuronowe w analizie sygnałów biomedycznych”:

- Zrealizował cel rozprawy,
- Uzyskał oryginalne rezultaty naukowe dotyczące diagnostyki epilepsji,
- Dokonał ciekawego wprowadzenia do tematyki, oraz przeglądu wybranych bieżących pozycji literaturowych dotyczących tematu,
- zbudował ustrukturyzowany zbiór przebiegów EEG wraz z resamplingiem i oczyszczeniem danych oraz jego analizą statystyczną,
- Zastosował metody statystyczne do obróbki sygnału EEG,
- Zastosował przekształcenia do dziedziny częstotliwości,
- Zastosował klasyczne klasyfikatory oraz rekurencyjne sieci neuronowe LSTM do diagnozy epilepsji offline i online z przebiegów EEG,
- Wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i wiedzą w zakresie uczenia maszynowego oraz przetwarzania szeregów czasowych.

Doktorant jest współautorem około 15 publikacji w czasopismach, materiałach konferencyjnych oraz rozdziałach w monografiach.

Recenzowana praca spełnia wymagania ustawy o tytule i stopniach naukowych w dyscyplinie naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

*Rafał Scherer*