

Prof. dr hab. inż. Ewa Skubalska-Rafajłowicz

Katedra Informatyki Technicznej
Wydział Informatyki Technicznej i Telekomunikacji
Politechnika Wrocławska

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA

Sekretariat
Data wpływu 8.12.2025r.
Numer.....

Recenzja pracy doktorskiej mgr Rauzana Sumary pt. „Multiple Representation-Based Ensembles for Time Series Classification”

Do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia naukowego doktora Panu mgr Rauzanowi Sumara w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja zostałam powołana uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.

Podstawą postępowania jest rozprawa doktorska pt. "Multiple Representation-Based Ensembles for Time Series Classification".

Promotorem pracy jest prof. dr hab. Władysław Homenda.

Przedstawiona do oceny praca doktorska mgr Rauzana Sumary została napisana w języku angielskim i wydrukowana w formie książkowej przez Radę Naukową Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.

Książka składa się z 6 rozdziałów oraz bibliografii.

Dodatkowo dołączony został spis 3 publikacji (P1-P3), w których jego autorski wkład, zgodnie z oświadczeniem Kandydata zawartym w pierwszym rozdziale Rozprawy, stanowi istotną merytoryczną podstawę Doktoratu. Są to prace współautorskie, w których Kandydat jest pierwszym autorem.

Omówienie zawartości pracy

W pierwszym, wstępnym rozdziale rozprawy Kandydat omawia istotne elementy, które występują w problemach klasyfikacji szeregów czasowych, takie jak łączenie różnych metod reprezentacji szeregów czasowych. Kandydat zapowiada przedstawienie:

- nowej metody MuRBE grupowania takich reprezentacji na etapie podejmowania decyzji przez zespół klasyfikatorów korzystający ze wspomnianych wcześniej różnych reprezentacji.

Wśród tych reprezentacji znajdują się dwie zaproponowane przez Kandydata

- Oparty na wyznaczaniu cech autoregresyjny ułamkowo całkowany model ruchomej średniej we współpracy z klasyfikatorem w postaci lasu losowego (ARFIMA-RF)
- Słownikowy model symbolicznej i przybliżonej agregacji z warstwą jednostek GRU i sieciami CNN.

W tym kontekście, celem pracy, choć nie został on bezpośrednio sformułowany, jest zbadanie jakości zaproponowanych rozwiązań zarówno pod kątem zarówno dokładności klasyfikacji jak i czasu konstrukcji.

W rozdziale drugim Kandydat omawia specyfikę klasyfikacji szeregów czasowych oraz zestaw zbiorów danych zgromadzonych w archiwach danych a także opisuje kilka przykładów takich zbiorów pochodzących z różnych dyscyplin wiedzy. Są to głównie szeregi jednowymiarowe z bazy UCR/UCA, na które składają się sekwencje wartości numerycznych.

Kolejny, trzeci rozdział cytuje i systematyzuje aktualne prace metodologiczne i przeglądowe z tematyki klasyfikacji szeregów czasowych (2017 - 2024 rok).

Zgodnie z podziałem ustalonym w omawianej poddziedzinie metody klasyfikacji szeregów czasowych zostały szczegółowo omówione w grupach obejmujących kolejno: metody oparte na cechach i ich ekstrakcji, metody słownikowe w różnych wariantach, metody oparte na przedziałach czasowych oraz metody oparte na kształtach (shapelets).

Poza metodami indywidualnymi Doktorant omówił też szczegółowo znane aktualnie metody grupowe (komitety klasyfikatorów).

Do przedstawionych dalej porównań z własnymi rozwiązaniami Doktorant wybrał algorytmy, które reprezentują różne podejścia, a których implementacje programowe są dostępne.

Rozdział 2 i 3 mają charakter przeglądowy i dobrze przedstawiają stan literatury w dziedzinie klasyfikacji szeregów czasowych. Podstawa tego przeglądu był cytowany w rozprawie system aeon oraz publikacja [21].

Przegląd klasyfikatorów grupowych ściśle wiąże się z merytoryczną problematyką rozprawy.

W kolejnym rozdziale Kandydat bardzo szczegółowo zaproponowane przez siebie rozwiązania, które składają się na postać klasyfikatora grupowego MuRBE (Multiple Representation-Based Ensembles).

Przedstawiono kolejno opis użytych w rozprawie rozwiązań szczegółowych, które dokładniej omówię przy ocenie oryginalności metod algorytmicznych zawartych w rozprawie i o wartości merytorycznej pracy.

Rozdział 5, zawiera opis koncepcji przeprowadzonych badań eksperymentalnych, które obejmowały porównania działania klasyfikatorów autorskich i innych powszechnie znanych algorytmów klasyfikacji. Badania przeprowadzono na szerokim zbiorze danych porównawczych (40 zbiorów z baz UCR/UCA). W rozdziale tym zostały przedstawione istotne informacje dotyczące zbiorów danych (UCR/UCA). Podkreślono też ich różnorodność, która nie pozwala na preferowanie tylko jednej grupy algorytmów. Monitorowane były takie wskaźniki jakości klasyfikacji jak dokładność (ACC), zbalansowana dokładność oraz wynik F1.

Poprawne testowanie takich wielokrotnych porównań wymaga odrębnych procedur post-hoc i modyfikacji poziomu istotności. Wyniki były wizualizowane z użyciem diagramów różnic krytycznych CD (różnic między rangami w odniesieniu do wszystkich trzech kryteriów). Badanie istotności różnic oparto na teście rangowym Wilcoxon z korektą Holma.

Obok tego Doktorant posłużył się też macierzą wielokrotnych porównań MCM [70], która jest uzupełnieniem metody CD Damsara.

Macierz MCM jest używana w pracy do prezentowania wyników porównania wszystkich par klasyfikatorów na podstawie średniej wartości uzyskiwanej dokładności, dokładności zbalansowanej i wyniku F1.

Kandydat umieścił też w pracy rozkłady uzyskiwanych dokładności i ich kwantyle dotyczące wszystkich 24 rozpatrywanych pojedynczych klasyfikatorów, w tym klasyfikatorów z grupy STA.

Równie szczegółowe porównania dotyczyły algorytmu MuRBE i innych znanych klasyfikatorów grupowych.

Doktorant przeprowadził dokładne badania porównawcze pod kątem zależności wyników od konkretnego zbioru danych, oraz, co bywa także istotne, od czasu ich trenowania i testowania. W tym ostatnim badaniu MuRBE osiągało czasy, które mieściły się w połowie zakresu wyznaczanego przez najszybsze i najwolniejsze algorytmy.

Przedstawiony w pracy algorytm grupowy MuRBE dość często wprawdzie przegrywał pod kątem ACC, bACC i F1 z algorytmem HIVE-COTE 2.0, ale różnice te były bardzo małe i w zasadzie oba algorytmy zajmowały najlepsze miejsca w rankingach.

Natomiast z punktu widzenia czasów uczenia i testowania HIVE-COTE 2.0 wymagał ponad dwukrotnie więcej czasu niż MuRBE.

Ocena oryginalności rozwiązań algorytmicznych przedstawionych w rozprawie

Zgodnie z opisem udziału Doktoranta w publikacjach, które stanowią merytoryczną podstawę rozprawy :

1. Kandydat jest autorem idei nowej metody klasyfikacji szeregów czasowych opartej na modelu ARFIMA, w której estymowane parametry modelu składają się na wektor cech w algorytmie klasyfikacji. Jako metodę estymacji Doktorant użył algorytmu Hyndmana wskazanego na stronie internetowej (poz.[66]), który okazał się efektywny w odniesieniu do użytych w pracy zbiorów i algorytmu lasu losowego. Metody tej nie stosowano do tej pory w odniesieniu do zadania klasyfikacji szeregów czasowych.

2. Doktorant zaproponował użycie do klasyfikacji szeregów czasowych architekturę SGCNN, w której połączenie symbolicznej aproksymacji agregatu (kodowanie SAX) z prostymi bramkami rekurencyjnymi (GRU) stanowi wejście do spłotowej sieci neuronowej (CNN). Metodę tę opublikował jako współautor w pracy[P2]. Architektura SGCNN jest zmodyfikowaną wersją architektury użytej w pracy [68] dotyczącej analizy sentymentów we wpisach internetowych. Do przetransformowania szeregu czasowego w szereg symboli zastosowano zmodyfikowaną procedurę symbolicznej aproksymacji agregatowej (SAX), która w tym przypadku działa jak specyficzny system kwantyzacji przedziałowej. Architektura SCCNN przeniesiona z zastosowań modeli językowych jest oryginalnym rozwiązaniem w odniesieniu do problemów klasyfikacji szeregów czasowych.

3. Kandydat zaproponował nowy klasyfikator grupowy MURBE, w którym poza dwoma poprzednio wymienionymi algorytmami klasyfikacji użyto także dwu innych znanych z literatury: DrCIF(poz. [2]) oraz RDST (poz. [8]).

Poza wybranymi klasyfikatorami, z których każdy pochodzi z jednej z 4 wymienionych grup reprezentacji szeregów czasowych, najważniejszym elementem MuRBE i najciekawszą nową ideą jest sposób łączenia klasyfikatorów składowych grupy.

Zastosowanie - w odniesieniu do przedziału wartości prawdopodobieństw $[0,1]$
- dwóch funkcji, z których jedna obniża ryzyko w odniesieniu do dużych wartości

prawdopodobieństw , a druga zwiększa ryzyko w przypadku małych wartości prawdopodobieństw. Efekt końcowy jest uzyskiwany poprzez agregację rozmytych ryzyk jednostkowych. Wynik końcowy powstaje, co zrozumiałe, poprzez wybór minimalnego rozmytego ryzyka. Eksperymenty pokazały, że taki sposób łączenia klasyfikatorów jest wyjątkowo efektywny.

Oceniana rozprawa zawiera niewątpliwie oryginalne algorytmy klasyfikacji szeregów czasowych oraz poprawnie zweryfikowane wyniki badań eksperymentalnych.

Ocena wartości merytorycznej rozprawy

Wartość merytoryczna rozprawy oceniam bardzo wysoko.

Doktorant wykazał się umiejętnością wprowadzenia czytelnika w rozwijaną przez siebie tematykę badawczą, dokonał poprawnego doboru metodologii realizowanych eksperymentów obliczeniowych, w przemyślany sposób wybrał w celach porównawczych algorytmy realizujące znane metody klasyfikacji szeregów czasowych.

Pracę tę cechuje poprawny dobór narzędzi statystycznych użytych do analizy wyników eksperymentów, klarowny sposób przedstawienia rezultatów i ich wnikliwa analiza.

Bardzo dobra i przekonująca jest również prezentacja wizualna wyników badań obliczeniowych.

Ocena poziomu redakcji pracy

Pracę czyta się bardzo dobrze. Jest napisana w języku angielskim w sposób rzeczowy i klarowny, bez jakichkolwiek niejednoznaczności. Rozprawa cechuje się też bogatą i dobrze obrazującą wyniki szatą graficzną.

Redakcja pracy jest wyjątkowo staranna. Zauważyłam jedynie dwa błędy korektorskie:

- a) Zmieniona jest kolejność podsekcji, 3.34 wyprzedza 3.33.
- b) Rysunek 15 ma błędy korektorskie w opisie (trzy razy występuje "di erence" zamiast difference).

Mam jeszcze jedną uwagę, która należy traktować raczej jako podpowiedź metodologiczna do dalszych badań.

Warto w porównaniach wyników klasyfikacji obok kryterium F1 zastosować współczynnik korelacji Matthews. MCC uchodzi za wskaźnik niosący więcej informacji niż pozostałe mierniki nawet jeśli dane w klasach nie są zbalansowane.

Pytania do Doktoranta:

- Kto stworzył implementację programową metody MuRBE ?
- Czy Doktorant próbował „wyjść ze strefy komfortu” i użyć MuRBE w odniesieniu do realnego problemu ?

Wniosek końcowy

Uważam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr Rauzana Sumary pt. Multiple Representation-Based Ensembles for Time Series Classification w pełni spełnia wszystkie warunki stawiane rozprawom doktorskim.

Przedstawiona praca prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Kandydat wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Mgr Rauzan Sumara przedstawił i poprawnie zweryfikował oryginalne rozwiązanie problemu klasyfikacji szeregów czasowych, które w wielu przypadkach daje lepsze rozwiązania niż najlepsze znane do tej pory algorytmy.

Ponadto mgr Rauzan Sumara jest autorem i współautorem wielu publikacji, a trzy z nich, w których jest pierwszy autorem, zostały opublikowane w materiałach bardzo wysoko ocenianych konferencji.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Rauzana Sumary spełnia z nadmiarem wszystkie wymogi stawiane w aktualnej Ustawie pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

W związku z moją pod każdym względem bardzo wysoką oceną przedstawionej pracy doktorskiej mgr Rauzan Sumara proponuję, by praca ta została wyróżniona.

Wrocław 30.11.2025

Ewa Skubalska-Rafałowicz

