

dr hab. Małgorzata Przybyła-Kasperek, prof. UŚ
Instytut Informatyki
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski w Katowicach
ul. Będzińska 39, 41-205 Sosnowiec

Katowice, 20.07.2023r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Sebastiana Stawickiego pt. „Ensembles of Classifiers Based on Decision Bireducts”

Niniejsza recenzja jest sporządzona w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscyplin Matematyka i Informatyka Uniwersytetu Warszawskiego (Wydział Matematyki i Informatyki UW) prof. dr hab. Andrzeja Tarleckiego z dnia 29 maja br. zawierającego prośbę o zrecenzowanie rozprawy doktorskiej mgra Sebastiana Stawickiego.

1. Problematyka badawcza pracy i jej znaczenie

Tematyka rozprawy doktorskiej magistra Sebastiana Stawickiego wpisuje się w zagadnienia związane z uczeniem maszynowym, a dokładniej dotyczy metod nadzorowanego uczenia klasyfikatorów. Praca łączy ze sobą dwa bardzo istotne zagadnienia: teorię zbiorów przybliżonych, a w szczególności metody odkrywania zależności w danych oraz generowania minimalnego podzbioru atrybutów zachowującego możliwość poprawnego rozpoznania klasy decyzyjnej dla pewnego zbioru obiektów z podejściem budowania zespołów klasyfikatorów. Teoria zbiorów przybliżonych, zaproponowana w latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku, jest w dalszym ciągu rozwijana i badana w kontekście m.in. redukcji wielowymiarowości oraz budowania modeli opartych na regułach decyzyjnych, które można w prosty sposób zinterpretować i są zrozumiałe dla człowieka. Z kolei w latach dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku zaproponowana została koncepcja budowania zespołów prostych klasyfikatorów i łączenia wyników ich predykcji zamiast budowania jednego złożonego klasyfikatora. To podejście jest obecnie jednym z intensywniej rozwijanych gdyż pozwala na poprawę jakości klasyfikacji w porównaniu do klasycznych podejść oraz na zbudowanie bardziej stabilnego klasyfikatora, który jest odporny na szum w danych. Ponadto podejście wielomodelowe umożliwia przetwarzanie dużych zbiorów danych oraz wykorzystanie danych, które są dostępne w odstępach czasu. Istotną wadą tego rozwiązania jest niestety utrata interpretowalności klasyfikatora.

Doktorant w swojej rozprawie podejmuje zagadnienia związane z wyjaśnieniem analogii i powiązań pomiędzy bireduktami decyzyjnymi, klasycznymi reduktami decyzyjnymi, przybliżonymi reduktami decyzyjnymi oraz γ -reduktami decyzyjnymi. Prezentuje algorytmy i heurystyki wyznaczania bireduktów decyzyjnych oraz dowodzi m.in., że problem generowania minimalnego bireduktu jest NP-trudny. Ważnym wynikiem jest zaproponowanie metody budowania zespołów klasyfikatorów opartego na bireduktach decyzyjnych. Istotna jest również przedstawiona analiza poprawności klasyfikacji takiego zespołu poprzez zagwarantowanie, że więcej niż połowa klasyfikatorów bazowych poprawnie klasyfikuje każdy

obiekt treningowy i przedstawienie szeregu własności takiego zespołu. Magister Sebastian Stawicki prowadził również prace badawcze nad poprawą interpretowalności proponowanego zespołu klasyfikatorów poprzez zaproponowanie metryk i metody oceny istotności atrybutów wykorzystywanych przez zespół bireduktów decyzyjnych. W pracy poruszono również problematykę definiowania bireduktów decyzyjnych dla strumieni danych.

W pracy nie zdefiniowano wprost tezy. Jednak Autor w rozdziale 1.2 *Main Contributions* podaje w punktach główny wkład pracy. Został on zaprezentowany w trzech podgrupach: w odniesieniu do pojęcia bireduktów decyzyjnych, w odniesieniu do zespołów bireduktów decyzyjnych oraz wkład ogólny. Szczegółowo zostały wypisane wszystkie cele pracy, z których najważniejsze to:

- zbadanie powiązania między bireduktami decyzyjnymi a reduktami decyzyjnymi i przybliżonymi reduktami decyzyjnymi;
- wprowadzenie algorytmów i heurystyk efektywnego wyszukiwania bireduktów decyzyjnych i ich wariantów;
- wprowadzenie szczególnego przypadku pojęcia bireduktów decyzyjnych w domenie strumieni danych i wykorzystanie go w sytuacjach, w których kompletny zestaw danych nie jest dostępny jednocześnie, a kolejne obserwacje są przetwarzane przyrostowo;
- zbadanie koncepcji zespołów bireduktów decyzyjnych i ich właściwości;
- wykazanie, że problem optymalizacji polegający na znalezieniu najprostszego poprawnego zestawu bireduktów decyzyjnych jest NP-trudny;
- zaproponowanie metody oceny atrybutów wykorzystywanych w zespołach bireduktów decyzyjnych w celu zwiększenia interpretowalności modelu;
- przeprowadzenie eksperymentów na zestawach danych syntetycznych, danych z repozytorium i rzeczywistych.

Uważam, że tematyka poruszana w pracy jest istotna i wpisuje się w obecny nurt poszukiwania nowych metod budowy efektywnych zespołów klasyfikatorów oraz zachowania interpretowalności modelu. W dobie dużych zbiorów danych równie istotna jest możliwość redukcji wielowymiarowości jak i badania zależności w danych oraz wyznaczenia zbioru istotnych atrybutów. Omówienie powiązań między różnymi typami reduktów ma duże znaczenie teoretyczne. Podsumowując poruszane przez Doktoranta problemy badawcze są istotne zarówno pod kątem praktycznych zastosowań jak i teoretycznych rozważań.

2. Poprawność i struktura pracy

Rozprawa liczy 184 strony podzielone na osiem rozdziałów, dodatkowo zawiera dwa dodatki oraz bibliografię. Praca napisana została w języku angielskim oraz złożona w systemie LaTeX. Na uwagę zasługuje duża dokładność i konsekwencja Doktoranta w używaniu notacji matematycznej. Nie zauważyłam w tym względzie żadnych usterek. Definicje, wnioski i dowody tych wniosków są przedstawiane w sposób spójny i przejrzysty. W rozprawie zamieszczono również wiele przykładów obliczeniowych i realizacji algorytmów przedstawianych często w wersji graficznej i/lub tabelarycznej, które sprawiają, że całość jest bardzo czytelna i jasna.

Rozdział 1. stanowi wprowadzenie, w którym przedstawiono problem badawczy, plan rozprawy, wkład pracy oraz przegląd literatury. Przegląd literatury mógłby być nieco szerszy. Nie uwzględniono w nim takich zagadnień jak pojęcie C-reduktów, które stanowi inne

podejście do wyznaczania zbioru istotnych atrybutów. W kontekście zespołów klasyfikatorów brak również odniesienia do tematyki uczenia federacyjnego.

W rozdziale 2. wprowadzone zostały podstawowe pojęcia związane z tablicami decyzyjnymi, zadaniem klasyfikacji jak również metodami ewaluacji klasyfikatorów.

Rozdział 3. zawiera omówienie pojęć związanych z teorią zbiorów przybliżonych ze szczególnym uwzględnieniem przybliżonych reduktów decyzyjnych.

Rozdział 4. stanowi główny wkład teoretyczny pracy. Przedstawiono w nim definicje różnych typów bireduktów decyzyjnych, własności bireduktów decyzyjnych, powiązanie bireduktów decyzyjnych z klasyfikatorami regułowymi. Opisano sposób wyznaczania bireduktów decyzyjnych poprzez definiowanie odpowiedniej funkcji boolowskiej oraz wyznaczenie implikantów pierwszych tej funkcji. Jest to metoda wzorowana na klasycznym algorytmie wyznaczania reduktów wykorzystującym funkcję rozróżnialności, jednak wymagała modyfikacji, a tym samym przedstawienia dowodów uzasadniających jej poprawność. W rozdziale tym przedstawiono również dowody, że problem wyznaczania bireduktów decyzyjnych o minimalnej liczbie atrybutów jest problemem NP-trudnym. Kolejnym ważnym pojęciem definiowanym w rozdziale 4. jest pojęcie zespołów klasyfikatorów bireduktów decyzyjnych. Klasyfikatory bazowe definiowane na podstawie bireduktu są wyspecjalizowane w rozpoznawaniu pewnego podzbioru obiektów ze zbioru treningowego. Wynika to wprost z definicji bireduktu decyzyjnego, który jest parą podzbioru atrybutów i podzbioru obiektów. Jest to minimalny podzbiór atrybutów, który zapewnia poprawną klasyfikację dla maksymalnego podzbioru obiektów. Dzięki temu otrzymujemy zespół klasyfikatorów o zupełnie innych własnościach niż ten, który mógłby być zdefiniowany na podstawie przybliżonych reduktów decyzyjnych oraz innych podejść znanych z literatury. Doktorant przedstawia również definicję poprawnego zespołu bireduktów decyzyjnych przy wykorzystaniu głosowania większościowego oraz najprostszego poprawnego zespołu bireduktów decyzyjnych. Następnie dowodzi, że problem wyznaczania takiego zespołu jest NP-trudny.

W rozdziale 5. zaprezentowane zostały algorytmy wyznaczania bireduktów decyzyjnych. Zaproponowane algorytmy są wzorowane na algorytmie przedstawionym w pracy:

Dominik Ślęzak and Andrzej Janusz, Ensembles of Bireducts: Towards Robust Classification and Simple Representation. Future Generation Information Technology – Third International Conference, Korea, December 8-10, 2011. Proceedings, volume 7105 of Lecture Notes in Computer Science, pages 64-77. Springer, 2011.

W zaproponowanych algorytmach Doktorant szczególną uwagę zwraca na rozważanie permutacji nie tylko zbioru atrybutów, ale również zbioru obiektów, co ma znaczenie podczas wyznaczania bireduktów decyzyjnych. Do każdego z algorytmów przedstawiono przykład obrazujący jego realizację. W rozdziale tym zaprezentowano również pierwsze wyniki eksperymentalne uzyskane dla trzech zbiorów danych z repozytorium przy zastosowaniu zespołów bireduktów decyzyjnych. Jako metodę fuzji predykcji klasyfikatorów bazowych wykorzystano tutaj głosowanie większościowe oraz zrównoważone głosowanie ważne. Brakuje jednak wyraźnego wskazania wkładu Doktoranta w uzyskanie wyników prezentowanych na rysunkach 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, gdyż wydają się one zaczerpnięte z pracy

przytoczonej powyżej. Dalej rozważono pojęcie bireduktu decyzyjnego dedykowanego dla danych strumieniowych oraz przedstawiono przykład obliczeniowy wyznaczania temporalnych bireduktów decyzyjnych. Rozdział zakończony został przedstawieniem idei biblioteki Python, która została przygotowana przez Doktoranta i udostępniona na platformie GitHub. Biblioteka zawiera implementacje algorytmów omówionych w rozprawie.

Rozdział 6. przedstawia opis rzeczywistego problemu wspomagania rekrutacji specjalistów IT w firmie HR, który został rozpatrzony w kontekście zastosowania zespołów bireduktów decyzyjnych. Model ma za zadanie wyznaczenie prawdopodobieństwa z jakim dana osoba będzie chciała zmienić zatrudnienie przy uwzględnieniu danej oferty pracy. W rozdziale tym przedstawiono opis atrybutów warunkowych występujących w zbiorze danych, podano metodologię eksperymentalną oraz porównano wyniki uzyskane przy zastosowaniu zespołu bireduktów decyzyjnych z dwoma algorytmami XGBoost oraz drzewami decyzyjnymi. Najlepsze wyniki osiąga tutaj algorytm XGBoost, nieco gorsze zespół bireduktów decyzyjnych.

W rozdziale 7. zaproponowana została metoda oceny istotności atrybutów dla zespołu przybliżonych reduktów decyzyjnych, a w kolejnym kroku rozszerzona na zespół bireduktów decyzyjnych, model XGBoost oraz dowolny model uczenia maszynowego. Zastosowano podejście polegające na generowaniu dodatkowych atrybutów tzw. przetasowanych atrybutów na podstawie oryginalnych atrybutów. Atrybuty przetasowane są definiowane poprzez permutacje wartości przypisanych na zbiorze obiektów. W rozdziale tym przedstawiono wyniki eksperymentalne z zastosowaniem zaproponowanego podejścia dla danych syntetycznych, danych z repozytorium i jednego rzeczywistego zbioru danych dotyczącego rekrutacji specjalistów IT. Wykazano, że podejście oparte na zespole bireduktów decyzyjnych generuje bardziej wiarygodny ranking atrybutów niż to oparte na algorytmie XGBoost czy korelacji. Wynika to z faktu, że XGBoost skupia się na niewielkiej liczbie atrybutów najistotniejszych, a dla pozostałych – mniej istotnych – atrybutów nie odróżnia atrybutów oryginalnych od przetasowanych.

Rozdział 8. stanowi podsumowanie pracy i osiągniętych wyników jak również przedstawienie dalszych kierunków rozwoju.

Bibliografia jest bogata, liczy 144 pozycje. Prace zostały dobrane w sposób poprawny, jedynie można było dodać prace poświęcone innym podejściom do wyznaczania reduktów jak C-redukty oraz rozszerzyć przegląd podejść rozproszonego uczenia o uczeniu federacyjne.

W rozprawie zamieszczona dwa dodatki. W pierwszym dodatku przedstawiono wyniki eksperymentalne dla wybranych zbiorów danych przy zastosowaniu proponowanego podejścia do oceny istotności atrybutów. W drugim dodatku zaprezentowano przykłady użycia biblioteki Python udostępnionej przez Doktoranta.

Uważam, że struktura pracy jest w pełni poprawna. Język pracy jest bardzo dobry natomiast redakcja staranna. Zaproponowany układ odpowiada wypunktowanym wcześniej problemom badawczym i pozwala na systematyczną analizę i rozwiązywanie tych problemów.

3. Najważniejsze wyniki naukowe

Wyniki przedstawione w rozprawie zostały częściowo opublikowane w pracach:

1. Andrzej Janusz and Sebastian Stawicki. Applications of Approximate Reducts to the Feature Selection Problem. In Jingtao Yao, Sheela Ramanna, Guoyin Wang, and Zbigniew Suraj, editors, Rough Sets and Knowledge Technology – 6th International Conference, RSKT 2011, Banff, Canada, October 9–12, 2011. Proceedings, volume 6954 of Lecture Notes in Computer Science, pages 45–50. Springer, 2011.
2. Andrzej Janusz, Dominik Ślęzak, Sebastian Stawicki, and Krzysztof Stencel. A Practical Study of Methods for Deriving Insightful Attribute Importance Rankings Using Decision Bireducts. *Information Sciences*, vol. 645, 119354, 2023.
3. Sebastian Stawicki and Sebastian Widz. Decision Bireducts and Approximate Decision Reducts: Comparison of Two Approaches to Attribute Subset Ensemble Construction. In Maria Ganzha, Leszek A. Maciaszek, and Marcin Paprzycki, editors, Federated Conference on Computer Science and Information Systems – FedCSIS 2012, Wrocław, Poland, 9–12 September 2012, Proceedings, pages 331–338, 2012.
4. Sebastian Stawicki and Dominik Ślęzak. Recent Advances in Decision Bireducts: Complexity, Heuristics and Streams. In Pawan Lingras, Marcin Wolski, Chris Cornelis, Sushmita Mitra, and Piotr Wasilewski, editors, Rough Sets and Knowledge Technology – 8th International Conference, RSKT 2013, Halifax, NS, Canada, October 11–14, 2013, Proceedings, volume 8171 of Lecture Notes in Computer Science, pages 200–212. Springer, 2013.
5. Sebastian Stawicki, Dominik Ślęzak, Andrzej Janusz, and Sebastian Widz. Decision Bireducts and Decision Reducts – A Comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*, 84:75–109, 2017.
6. Dominik Ślęzak and Sebastian Stawicki. The Problem of Finding the Simplest Classifier Ensemble is NP-Hard – A Rough-Set-Inspired Formulation Based on Decision Bireducts. In Rafael Bello, Duoqian Miao, Rafael Falcon, Michinori Nakata, Alejandro Rosete, and Davide Ciucci, editors, Rough Sets – International Joint Conference, IJCRS 2020, Havana, Cuba, June 29 – July 3, 2020, Proceedings, volume 12179 of Lecture Notes in Computer Science, pages 204–212. Springer, 2020.

W moim odczuciu, można wymienić cztery najistotniejsze, oryginalne wyniki rozprawy. Pierwszym z nich są badania nad zdefiniowaniem poprawnego zespołu bireduktów decyzyjnych przy wykorzystaniu głosowania większościowego. Jest to szczególnie istotne w kontekście rozwoju zagadnień związanych z uczeniem rozproszonym. Nowością tego podejścia jest możliwość zbudowania klasyfikatorów bazowych, które będą wyspecjalizowane nie tylko pod kątem pewnej podprzestrzeni atrybutów, ale również pod kątem podprzestrzeni obiektów. Szczególnie wartościowe jest tutaj zdefiniowanie najprostszego poprawnego zespołu bireduktów decyzyjnych oraz dowód, że problem wyznaczenia takiego zespołu jest NP-trudny. Doktorant na kolejnych stronach rozprawy przedstawia algorytmy Ordering Algorithm oraz Sampling Algorithms w różnych wersjach, które pozwalają w praktycznych zastosowaniach na wyznaczenie podzbioru bireduktów decyzyjnych. Dzięki tym algorytmom możemy w pewnym sensie sterować liczebnością zbioru obiektów i zbioru atrybutów. Ponadto poprzez odpowiednie uporządkowanie zbioru obiektów i/lub zbioru atrybutów w permutacji podawanej na wejściu algorytmu możemy zwiększać prawdopodobieństwo, że biredukt decyzyjny będzie zawierał

wybrany obiekt, względnie wybrany atrybut. Wyniki te zostały częściowo zaprezentowane w pracach [5, 6].

Kolejnym bardzo istotnym wynikiem pracy są badania nad zaproponowaniem metody oceny istotności atrybutów w kontekście zespołów klasyfikatorów, która później została uogólniona na dowolny model uczenia maszynowego. Zaproponowano zupełnie nowy sposób oceny rankingu atrybutów poprzez dodanie przetasowanych atrybutów do zbioru danych, a następnie oceny czy dany model potrafi rozróżnić istotność oryginalnych i przetasowanych atrybutów. Należy podkreślić, że procedura jest ogólna i może zostać wykorzystana do oceny ważności atrybutów dla innych metod. Doktorant podjął pracę nad tym zagadnieniem chcąc poprawić interpretowalności tworzonego modelu zespołu bireduktów decyzyjnych. Jest to bardzo dobry kierunek, gdyż w uczeniu maszynowym obecnie prowadzone są intensywne prace nad generowaniem modeli, które byłyby czytelne, zrozumiałe dla ekspertów dziedzinowych. W pracy przedstawione zostały liczne badania, które pokazują duży potencjał zespołów bireduktów decyzyjnych w rozpoznawaniu pewnego większego podzbioru istotnych atrybutów warunkowych. Wyniki te zostały częściowo zaprezentowane w pracach [1, 2].

Następnym istotnym osiągnięciem naukowym jest przedstawienie szerokiego porównania teoretycznego bireduktów decyzyjnych, γ -bireduktów decyzyjnych, reduktów decyzyjnych i przybliżonych reduktów decyzyjnych oraz sformułowanie i udowodnienie licznych zależności zachodzących między nimi. Tutaj Doktorant podał wyczerpujące dowody i przykłady. Ponadto zaproponował metodę generowania bireduktów decyzyjnych oraz γ -bireduktów decyzyjnych poprzez wyznaczenie implikantów pierwszych odpowiedniej funkcji boolowskiej oraz udowodnił jej poprawność. Następnie podał miarę optymalności bireduktów decyzyjnych pod kątem minimalizacji liczności zbioru atrybutów i maksymalizacji liczności zbioru obiektów oraz zdefiniował ε -biredukty decyzyjne, a następnie udowodnił, że problem wyznaczania minimalnego ε -bireduktu decyzyjnego jest NP-trudny. W pracy przedstawiono 31 wniosków/faktów z dowodami. Ta liczba świadczy o dużym wkładzie wyników teoretycznych zaprezentowanych w rozprawie. Wyniki częściowo zostały przedstawione w pracach [3, 4].

Kolejnym istotnym osiągnięciem naukowym jest również rozszerzenie pojęcia bireduktu decyzyjnego dla danych strumieniowych. Doktorant przedstawił definicję temporalnych bireduktów decyzyjnych. Następnie zaproponował metodę wyznaczania takich reduktów oraz przedstawił przykład obliczeniowy. W rozprawie nie zaprezentowano wyników eksperymentalnych. Zapewne to zagadnienie będzie podejmowane w przyszłej pracy. Rezultaty częściowo zostały zaprezentowane w pracy [4].

W mojej opinii wyniki naukowe zawarte w rozprawie są oryginalne i stanowią istotny wkład w obszarze metod nadzorowanego uczenia klasyfikatorów.

Doktorant jest współautorem 28 publikacji, nie wszystkie zostały wymienione w bibliografii rozprawy, gdyż dotyczą innej tematyki. W bazie DBLP uwzględnionych zostało 25 prac Doktoranta. W bazie Google Scholar indeks Hirscha Doktoranta wynosi 12, co wskazuje na uznanie prac w społeczności naukowców. Na uwagę zasługuje też fakt opublikowania kilku prac w renomowanych czasopismach takich jak Information Sciences (dwie prace) czy International Journal of Approximate Reasoning (jedna praca). Pozostałe prace zostały zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach naukowych. W mojej opinii dowodzi to z nadmiarem umiejętności prowadzenia badań naukowych.

4. Uwagi i dyskusja

Pracę oceniam wysoko pod kątem teoretycznych rozważań jak i praktycznych zastosowań, które zostały pokazane na wybranych zbiorach danych oraz na przykładzie jednego rzeczywistego zbioru danych. Nie zauważyłam w pracy poważniejszych błędów merytorycznych, jednak przedstawiam powyższe uwagi do dyskusji i ewentualnego przemyślenia na przyszłość.

Pierwsza uwaga dotyczy analizy różnych metod budowania zespołów klasyfikatorów znanych z literatury. Jak wiadomo istnieją dwa zasadnicze podejścia do budowy modeli zagregowanych. W pierwszym wszystkie modele bazowe generują predykcje dla obiektów testowych, a następnie dokonuje się łączenia wyników wygenerowanych przez modele bazowe. W drugim podejściu dany model bazowy jest wyspecjalizowany w generowaniu predykcji dla obiektów z określonej podprzestrzeni (wyznaczonej względem cech lub obiektów). Wtedy przy wyznaczaniu predykcji dla obiektu testowego dokonywana jest selekcja modelu odpowiedniego dla podprzestrzeni do której należy obiekt testowy. W rozprawie pominięto drugie podejście do budowy zespołów klasyfikatorów. Wydaje się, że zespół oparty na bireduktach decyzyjnych może być dobrym przykładem wykorzystania modeli bazowych wyspecjalizowanych w predykcji dla danej podprzestrzeni obiektów/cech. Taka analogia wynika z samej definicją bireduktów decyzyjnych.

Jak wiadomo w budowaniu wysokiej jakości zespołów klasyfikatorów bardzo ważne są dwa aspekty dotyczące klasyfikatorów bazowych: ich różnorodność i niezależność. W pracy nie przedstawiono dyskusji na ten temat. Zastanawiam się czy klasyfikatory bazowe zbudowane na podstawie poszczególnych bireduktów decyzyjnych dla większych zbiorów danych niż ten który został przedstawiony jako przykład w tabeli 3.1 (str. 22 rozprawy) zachowują dużą różnorodność pod kątem wykorzystywanego zbioru atrybutów, zbioru obiektów. Domyślam się, że tak właśnie jest i w tym upatruję powód uzyskania dobrej jakości klasyfikacji dla zespołów bireduktów decyzyjnych (co zostało zaprezentowane w rozdziale 6.4 rozprawy).

Rozważania przedstawione w rozprawie na temat temporalnych bireduktów decyzyjnych pozostawiają pewien niedosyt. W pracy nie podano algorytmu wyznaczania tego typu reduktów. W pracy nie skomentowano czy to podejście było rozważane eksperymentalnie. Czy były prowadzone porównania wyników uzyskanych przy zastosowaniu proponowanego podejścia z innymi metodami dedykowanymi do danych strumieniowych?

W pracy przedstawiono porównanie wyników jakości klasyfikacji (accuracy i balanced accuracy) uzyskanych przy zastosowaniu zespołów bireduktów decyzyjnych, lasów losowych i zespołów wykorzystujących regresję logistyczną. Eksperymenty przeprowadzono na trzech zbiorach danych z repozytorium. Prezentacja wyników pracy zyskałaby na wartości, gdyby wykorzystano większą liczbę zbiorów danych oraz przebadano więcej podejść. Chociażby dla spójności z wynikami prezentowanymi w dalszej części rozprawy dobrze byłoby wykorzystać model XGBoost.

Ostatnia moja uwaga dotyczy wykorzystywanych metod fuzji. W pracy przedstawiono wykorzystanie głosowania większościowego oraz zrównoważonego głosowania ważonego jako metody fuzji w zespołach bireduktów decyzyjnych. Magister Sebastian Stawicki pisze wprawdzie, że na przyszłość planuje zastosować więcej metod i jak najbardziej uważam te plany za słuszne. Myślę, że warto wykorzystać metody dedykowane dla trzech różnych

rodzajów predykcji generowanych przez klasyfikatory bazowe: abstrakcyjne, rangowe i pomiarowe, gdyż wszystkie te typy predykcji mogą być uzyskane z zastosowaniem klasyfikatorów opartych na regułach decyzyjnych.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa zawiera oryginalne rozwiązania postawionych problemów naukowych, które są istotne z punktu widzenia informatyki, a w szczególności teorii zbiorów przybliżonych i metod nadzorowanego uczenia klasyfikatorów. Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną w rozważanym temacie, umiejętnością prowadzenia pracy naukowej, przeprowadzania dowodów formalnych i rozwiązywania postawionych sobie problemów. Autor potwierdził skuteczność proponowanych rozwiązań poprzez przeprowadzenie eksperymentów obliczeniowych.

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana przez mnie rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy i wnoszę o dopuszczenie Pana magistra Sebastiana Stawickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz publicznej obrony.

Ze względu na wysoki poziom rozprawy, oryginalny wkład zaproponowanego rozwiązania oraz opublikowanie najważniejszych wyników rozprawy w uznanych czasopismach, wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Magazeta
Przybył - Kasperek