

Częstochowa, dn. 7 lipca 2022 r.

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

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Norberta Kozłowskiego, pt.: Real-valued Anticipatory Classifier System.

Niniejszą recenzję opracowano na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Wrocławskiej, która na posiedzeniu dnia 27 kwietnia 2022 roku powołała mnie na recenzenta. Promotorem jest prof. dr hab. inż. Olgierd Unold.

1. Charakterystyka tematu, celu i tezy badawczej rozprawy

Trwający od pewnego czasu szybki rozwój metod uczenia maszynowego oparty na sieciach neuronowych przynosi dosłownie co miesiąc nowe, spektakularne rezultaty. W większości metody te są czarną skrzynką, dlatego istnieje ciągle zapotrzebowanie na metody, w których wiedza będzie interpretowalna w możliwie przejrzysty sposób. Takimi metodami jest rodzina klasyfikatorów regułowych LCS, zaproponowana ponad 40 lat temu przez Johna Hollanda. Doktorant postanowił zmierzyć się z problemem możliwości użycia liczb rzeczywistych w przewidujących systemach LCS, formułując tezę pracy „Systemy klasyfikatorów antycypacyjnych mogą budować poprawny model wewnętrzny środowiska przy użyciu danych wejściowych o wartościach rzeczywistych.” Ogólnym celem pracy było opracowanie metod zastosowania liczb rzeczywistych w antycypacyjnych klasyfikatorach LCS wraz z implementacją w języku Python.

2. Zawartość rozprawy

Recenzowana praca mgr inż. Norberta Kozłowskiego składa się ze spisu skrótów, symboli, streszczeń, sześciu rozdziałów oraz bibliografii. Dokument liczy 130 stron.

WPLYNEŁO

11-07-2022

RDN-IT/212/2022

Pierwszy rozdział jest krótkim wprowadzeniem do problemu. Omówiona jest geneza i ogólny uczący się systemów klasyfikujących LCS zaproponowanych ponad 40 lat temu przez Johna Hollanda. Są to systemy oparte na zestawie klasyfikatorów (reguł). Przedstawiono ich odmianę – antycypacyjny uczący się system klasyfikujący (ACS) oraz jego odmiany rozwijane później. Zaprezentowano tezę pracy, oraz cele: stworzenie systemu ACS działającego na liczbach rzeczywistych, zaproponowanie odpowiednich benchmarków i metryk, ulepszeń uczenia ze wzmocnieniem, przeprowadzenie badań oraz stworzenie oprogramowania w języku Python. Omówiono strukturę rozprawy.

Rozdział 2 jest wprowadzeniem do systemów LCS wykorzystujących reguły IF – THEN jako podstawowy blok modelowania wiedzy. Reguły są generowane przez algorytmy genetyczne oraz uczenie ze wzmocnieniem. Omówiono dwa podejścia do reprezentacji klasyfikatorów przez populację algorytmu genetycznego – Michigan i Pittsburg, oraz warianty systemów LCS powstające przez lata: CS-1, ZCS, XCS. Omówiono obecne wyzwania takie jak wizualizacja wiedzy, zmniejszanie bazy reguł, ciągłe uczenie, wykorzystanie sieci spłotowych czy uczenie na wielu poziomach abstrakcji. Dalej Autor omawia przewidujące systemy LCS: CFCS2, ACS i ACS2. Systemy ACS wprowadziły komponent odkrywczy – przewidujący proces uczenia oparty na teorii behawioralnej Hoffmana. Omówiono dalej dokładnie systemy przewidujące YACS i MACS.

W podrozdziale 2.2 omówiono modyfikacje wykorzystujące rzeczywiste liczby na wejściach. Użycie liczb rzeczywistych w reprezentacji regułowej powoduje oczywiste problemy. Jednym z rozwiązań jest dyskretyzacja, której użycie omówione jest szczegółowo w rozdziale 2.2.1. Innym jest podejście wykorzystujące interwały (2.2.3), sieci neuronowe (2.2.3) czy logikę rozmytą (rozd. 2.2.4). Podrozdział 2.3 omawia parametry wydajnościowe dotyczące wielkości populacji, zdolności do uogólniania, wiedzy, szybkości działania czy wydajność eksploatacji. Rozdział 2.4 omawia przyjęty sposób oceny statystycznej za pomocą analizy Bayesowskiej. W podrozdziale 2.5 omówiono wykorzystane do przeprowadzenia eksperymentów zadania klasyfikacji oraz uczenia ze wzmocnieniem – korytarz, dwuwymiarowa siatka, rzeczywisty multiplekser, szachownica, odwrócone wahadło, świat stanów skończonych.

Rozdział 3 prezentuje autorskie metody użycia zmiennych ciągłych w przewidujących systemach LCS. W podrozdziale 3.1 Autor omawia system rvACS będący rozszerzeniem systemów ACS wykorzystującym interwały. System jest sprawdzony na problemach rzeczywistego multipleksera w wariacie trzybitowym oraz szachownicy. Podrozdział 3.2 omawia możliwości użycia rodziny systemów ALCS z danymi rzeczywistoliczbowymi poprzez dyskretyzację zmiennych. Systemy zostały sprawdzone na problemach rMPX, korytarz i siatka.

Rozdział 4 jest związany z dylematem Explore-Exploit w przeszukiwaniu przestrzeni. Omówiono cztery używane strategie wyboru. Strategie były sprawdzone na problemie rMPX, korytarza i siatki oraz odwróconego wahadła.

Rozdział 5 dotyczy optymalizacji dystrybucji nagrody dla klasyfikatorów. Autor zaimplementował dwa warianty systemu nazwanego AACCS2 z nowym, uśredniającym modulem przyznawania nagrody. Zaproponowane modyfikacje zostały sprawdzone na dwóch problemach korytarzy.

Rozdział 6 jest podsumowaniem rozprawy, w którym zebrano w jednym miejscu wnioski kończące opisy poszczególnych autorskich metod i eksperymentów. Doktorant podał również wiele pomysłów, które wytyczają wiele kierunków badawczych związanych z przewidującymi systemami LCS. W rozdziale zestawione są również publikacje Autora.

Pracę kończy bibliografia składająca się z 147 pozycji.

Praca napisana jest schludnie i przejrzysto. Ponadto na uwagę zasługuje użycie języka angielskiego na bardzo dobrym poziomie oraz systemu LaTeX do składu tekstu.

Drobne błędy edytorskie to np. używanie znaku dywiza zamiast półpauzy czy pojawienie się skrót rMPX pojawia się bez wyjaśnienia na stronie 43 bez wcześniejszego wyjaśnienia.

3. Ocena rozprawy

W ramach rozprawy doktorskiej Doktorant zaproponował oryginalne rozwiązanie problemu użycia liczb rzeczywistych w przewidujących uczących się systemach klasyfikatorów (LCS) z użyciem interwałów i dyskretyzacji. Do przetestowania opracowanych i istniejących wersji systemów ALCS użyto sześciu zróżnicowanych problemów oraz pięciu metryk. Zwiększona przestrzeń poszukiwań zwiększa naturalnie wymagania obliczeniowe, co zmusiło Autora do zoptymalizowania działania systemów antycypacyjnych. Przetestował w tym celu cztery strategie inteligentnego przeszukiwania przestrzeni rozwiązań oraz zaproponował swoją metodę opartą na rodzinie algorytmów *Optimistic Initial Quality*. Dla środowisk wielokrokowych, Autor zoptymalizował metodę ustalania parametru określającego oczekiwaną nagrodę klasyfikatora. Dało to lepsze efekty dla środowisk wymagających wykonania znaczącej liczby akcji w celu otrzymania nagrody. Doktorant stworzył ogólnodostępną bibliotekę programistyczną w języku Python, implementując popularne systemy z rodziny LCS (m.in. ACS, ACS2, YACS, MACS, X-NCS). Na uwagę zasługuje również nacisk na reprodukowalność eksperymentów.

Rozprawa doktorska uwidacznia wysoką ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną mgra inż. Norberta Kozłowskiego. Doktorant przeanalizował dorobek światowy od początku istnienia systemów z rodziny LCS. Zauważył istniejące problemy z nimi związane i zaproponował własne rozwiązania, które opublikował w czasopismach i materiałach renomowanych konferencji naukowych. Mgr Kozłowski opublikował kilka prac naukowych: m.in. dwie w czasopismach za 100 punktów, trzy prace w materiałach konferencji za 140 punktów. Zaprezentowany materiał pokazuje, że Doktorant zrealizował cel pracy.

Rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej mgra inż. Norberta Kozłowskiego. Opracował wprowadzenie do tematyki i dokonał przeglądu literatury dotyczącej systemów LCS. Stworzył autorskie oprogramowanie w języku Python, egzystujące w otoczeniu istniejącego ekosystemu bibliotek analizy danych i uczenia maszynowego. Przeprowadził bardzo dobrze zaplanowanych eksperymentów. Zadbął o popularyzację wyników swoich badań w wysokopunktowanych wydawnictwach.

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaproponowane metody mają duże znaczenie dla nauk technicznych, zarówno w teoretyczne, jak i aplikacyjne. Podjęta tematyka, czyli przewidujące metody klasyfikacji, w wysokim stopniu interpretowalne, mogą mieć wiele zastosowań, co pokazało chociażby szerokie spektrum problemów użytych w eksperymentach. Opracowanie autorskiego oprogramowania w języku Python jeszcze zwiększa możliwości aplikacyjne.

Możliwym zarzutem do pracy jest osadzenie jej w ekosystemie LCS. Przez to jest wiele odniesień do dość starych pozycji literaturowych. Przegląd literatury nie daje również osadzenia systemów LCS w pełnym obrazie uczenia maszynowego. Czy możliwe jest porównanie jakości i szybkości działania proponowanych systemów z np. obecnymi rozwiązaniami opartymi na sieciach neuronowych jednokierunkowych i rekurencyjnych, oraz połączonych z uczeniem ze wzmocnieniem? Ponadto, czy logika rozmyta, wzmiankowana tylko pokrótce, nie byłaby naturalnym sposobem na radzenie sobie z wartościami rzeczywistymi?

4. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Norbert Kozłowski w rozprawie doktorskiej „Real-valued Anticipatory Classifier System” zrealizował cel rozprawy. Zaprezentowane rezultaty stanowią oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Pan Norbert Kozłowski wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i wiedzą w zakresie uczenia maszynowego. Recenzowana praca spełnia wymagania ustawy o tytule i stopniach naukowych w dyscyplinie naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do dalszych etapów postępowania doktorskiego. Jednocześnie ze względu na wysoki poziom naukowy rozprawy, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

