

Wpłynęło dnia 3.09.2024

Zarejestrowano pod nr 510-3.5/24

Podpis 

Prof. dr hab. inż. Ewaryst Rafajłowicz
Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania
Wydział Informatyki i Telekomunikacji
Politechnika Wroclawska

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Mateusza Pabiana
Event-Based Machine Learning with Bayesian Methods and Spiking Neural Networks**

Aspekty formalne

Niniejsza recenzja powstała w wyniku powołania mnie przez Radę Naukową Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne AGH w Krakowie w związku z przewodem doktorskim Pana mgr Mateusza Pabiana. Rozprawa napisana jest w języku angielskim i składa się z sześciu rozdziałów i bibliografii liczącej 256 pozycji literatury. Zawiera też spisy wykresów i rysunków. Ponadto zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim.

Tematyka rozprawy

Zakres tematyczny rozprawy doktorskiej mieści się w nurcie badań zwanych uczeniem maszynowym. W tematyce tej Doktorant wyróżnił ważną klasę, mianowicie, procesów zdarzeniowych, wśród których neurony przetwarzające sekwencje impulsów stanowią bardzo ważną podklasę ze względu na ich związek ze sposobem funkcjonowania naszych neuronów.

Wśród podejść do klasyfikacji takich sygnałów, które Doktorant wybrał do opracowania jest metoda metodologicznie wywodząca się z podejścia bayesowskiego. Drugie podejście bazuje na uczeniu odpowiednio skonstruowanej impulsowej sieci neuronowej. Podejście to Doktorant uogólnia potem na przypadek wielowymiarowy.

Tematykę doktoratu uważam za nowatorską i ważną dla rozwoju algorytmów uczenia maszynowego.

Krótki Przegląd Zawartości Rozprawy

W tej części recenzji przedstawię zarys treści rozprawy, wskazując jednocześnie na oryginalne rezultaty Autora, zarówno teoretyczne, metodologicznie jak i rezultaty porównań obliczeniowych.

W Rozdziale pierwszym przedstawiono wstępny przegląd literatury, szersze przeglądy tematyczne znajdziemy na początkach odpowiednich rozdziałów. Rozdział wstępny przedstawia także motywy, którymi Autor się kierował wybierając zarówno tematykę, problemy jak i metody ich rozwiązywania.

Rozdział drugi zawiera już, po przedstawieniu podstawowych definicji, rezultaty własne mgr M. Pabiana. Rezultaty te są dwojakiego rodzaju. Programistyczne, skutkujące znacznym skróceniem czasów obliczeń, jak i zakresie postawienia problemu klasyfikacji intensywności procesów punktowych oraz jego rozwiązanie na podstawie danych empirycznych w postaci zaobserwowanych ciągów impulsów. Wyprowadzono regułę decyzyjną a na jej podstawie klasyfikator empiryczny, wybierając jako estymatory funkcji intensywności w klasach metodę formalnie podobną do estymatora Parzena i Rozenblata.

Doktorant zbadał warunki zgodności i wyprowadził zestaw warunków zbieżności empirycznego ryzyka do ryzyka Bayesa, gdy liczba przykładów rośnie do nieskończoności. Twierdzenia 2 i 3, które precyzują założenia, wskazują na pewne ich podobieństwa do warunków zbieżności estymatorów gęstości typu Parzena, jak na przykład, wymagania nakładane na ciąg parametrów wygładzania. Z drugiej strony, istotnie inaczej definiowane są przykłady uczące, które są paczkami impulsów. Mgr M. Pabian wskazał także na klasę przypadków, w których zbieżności nie da się uzyskać. Chodzi o sytuacje w których funkcje intensywności jest niezerową tylko na skończonym odcinku.

Oprócz asymptotyki, Doktorant zadbał o aspekty praktyczne proponowanego algorytmu. Mianowicie, opracował podejście do doboru parametru wygładzania dla skończonych długości ciągów uczących, bazujące na idei maksymalnej wiarygodności. Przedstawił trudności związane z efektem brzegowym, typowym dla większości estymatorów jądrowych i zaproponował modyfikacje, które ten efekt redukują. Zbadał także działanie proponowanego algorytmu na interesującym przykładzie praktycznym.

Opiszę go dokładniej, gdyż także on ma cechy oryginalności. Problem dotyczy wykrywania tzw. botów na platformach społecznościowych takich jak Twitter. Problem jest ważny bo boty służąc mogą do automatycznego powielania poglądów, sprawiając sztucznie wrażenie iż są one powszechne. Oryginalność podejścia Doktoranta polega na

przyjęciu bardzo realistycznego modelu dostępnych danych, a mianowicie odstępów czasów między pojawianiem się kolejnych wiadomości. Po przygotowaniu danych empirycznych Mgr M. Pabian przeprowadził szerokie i świadomie zaplanowane badania. Badał On, między innymi, szybkość zbieżności algorytmu uczenia się klasyfikatora, w zależności od ustawień hiperparametrów. Uzyskane wyniki dokumentują dobre właściwości zaproponowanego algorytmu uczenia klasyfikatora danych zdarzeniowych.

Rozdział trzeci rozpoczyna część rozprawy, w której Autor przedstawia drugie podejście do uczenia klasyfikatorów danych zdarzeniowych, które to klasyfikatory mają postać specjalnie skonstruowanej sztucznej sieci neuronowej, która przetwarza ciągi impulsów. Dlatego początek tego rozdziału to dobry przegląd tego co wiemy o sieciach tego typu w organizmach żywych. Dalsza część tego rozdziału ma podstawowe znaczenie dla reszty rozprawy. Doktorant przedstawia architekturę i zasady działania impulsowych sieci neuronowych (spiking neural networks). Empirycznie porównał różne rodzaje sieci impulsowych i zaproponował podejście do redukcji ich wad z punktu widzenia efektywności symulowania odpowiedzi sieci na ciąg impulsów wejściowych. Trudność polega na konieczności uzyskania odpowiedzi przyczynowej (nieantycypujacej).

Zaproponowane podejście, bazujące na architekturze obliczeń wektorowych, ma cechy oryginalności, a wyrażenie obliczeń w języku operacji Hadamarda ma elegancki, zwarty opis i pozwala na dalsze rozwijanie algorytmów. Dodatkowo, Mgr M. Pabian przeprowadził obliczenia porównawcze, dokumentujące skuteczność proponowanego algorytmu wektorowego. Porównania były dokonywane na zadaniach uczenia klasyfikatorów, co dodatkowo wymagało pokazania jak obliczać pochodne. Dalszym uogólnieniem było rozszerzenie do postaci obliczeń dla paczek (batch) oraz na przypadek wielu wejść i wyjść, co w rozważanych zadaniach nie było formalnym zabiegiem. Wspomniane wyżej testy prowadzone były na danych XOR i MNIST (znany benchmark). Dalsze, jeszcze bardziej pracochłonne, testy Doktorant przedstawia dla wspomnianego już problemu detekcji botów w sieci Twitter. Testy te prawdopodobnie skłoniły Autora do zaproponowania operacji binningu sekwencji impulsów oraz zastosowania spłaszczenia danych za pomocą logarytmu przesuniętego o jeden. Uzyskane na tym przykładzie miary jakości klasyfikacji stawiają proponowane podejście w czołówce wśród metod badanych w literaturze.

W celu przekonania się, że zaproponowane cztery ulepszenia są istotne, Doktorant przeprowadził eksperymenty obliczeniowe, polegające na wyłączaniu kolejnych modyfikacji. Zamieszczona tabela przekonująco dokumentuje istotność proponowanych ulepszeń,

Rezultaty zawarte w Rozdziale czwartym mają inny charakter niż omawiane dotąd. Dotyczą one uczenia na danych zdarzeniowych, lecz tym razem celem uczenia jest osiągnięcie, odpowiednio zdefiniowanych podobieństw. Szczególnie doceniam to że jako ocenę podobieństwa Doktorant wybrał metrykę Wassersteina, którą zmodyfikował w taki sposób, by dawała ona skończone wartości przy porównywaniu ciągów impulsów. Na tej bazie zaproponował oryginalną wersję tzw. sieci syjamskich w wersji od początku projektowanej dla sygnałów impulsowych. Podobnie jak poprzednie sieci, również te zostały przetestowane na MNIST, ale także na ciekawych obrazach astronomicznych, zbieranych pod kątem znajdowania cząstek o wysokich energiach (eksperyment znany pod akronimem CREDO). W obu przypadkach jakość uczenia była na wysokim poziomie, porównywalnym z osiągniętym innymi metodami.

Rozdział piąty zawiera propozycje uogólnia badanych sieci na przypadek wielowymiarowy. Ze względu na szybko rosnącą liczbę danych impulsowych uogólnienie to bynajmniej nie było łatwe. Doktorant zaproponował oryginalne podejście, polegające na zastosowaniu próbkowania nierównomiernego w czasie danych zdarzeniowych względem wartości składowych sygnałów. Zabieg ten pozwolił opracować wielowymiarową sieć impulsową i algorytm jej uczenia. Został on przetestowany na danych pochodzących z ruchu pojazdów.

Rozdział szósty zawiera trafne i zwięzłe podsumowanie rozprawy i idee rozwijania tematyki uczenia na danych zdarzeniowych,

Najważniejsze osiągnięcia zawarte w rozprawie

Jednym z najważniejszych osiągnięć jest samo sformułowanie zagadnień uczenia w sytuacjach gdy dane mają charakter zdarzeniowy, Doktorant zarysował ważność tej problematyki, przy czym przeglądy literatury rozpoczynające poszczególne rozdziały są wnikliwe i trafnie oddają aktualny stan badań.

Wśród wielu oryginalnych pomysłów Doktoranta chcę zwrócić uwagę na następujące osiągnięcia.

1. Wyróżnienie wśród zadań uczenia klasyfikatorów na podstawie danych zdarzeniowych podklasy problemów dla procesów punktowych i poszukiwania dla nich klasyfikatorów funkcji intensywności, które minimalizują ryzyko Bayesa. Po scharakteryzowaniu warunków optymalności, Doktorant opracował klasę algorytmów uczenia. Zatem, otrzymane rozwiązania nie są wstępnie ograniczone do klasy decyzji skończenie parametryzowalnych. Mgr M. Pabian opracował algorytmy uczenia się takich reguł decyzyjnych na podstawie danych

- empirycznych i wykazał zbieżność ryzyka stosowania takich decyzji do ryzyka bayesowskiego, czyli takiego jakie zapewnia reguła optymalna.
2. Dla w/w empirycznych algorytmów opracował regułę doboru hiperparametrów i przetestował ją na danych rzeczywistych. Zbadał też praktyczną szybkość zbieżności. W tym celu opracował ciekawy przykład testowy wykrywania botów w sieciach społecznościowych typu Twitter.
 - a. Już te wyniki, w mojej ocenie, wystarczyć mogą jako doktorat.
 - b. Dalsze osiągnięcia Doktoranta różnią się od powyższych tym, że klasyfikatory budowane są na sekwencjach impulsów, wprost w dziedzinie czasu.
 3. Doktorant pokonał podstawową trudność uczenia klasyfikatorów impulsowych w dziedzinie czasu, polegającą na bardzo dużych nakładach obliczeń potrzebnych do ustalenia wartości wyjść z sieci przy pobudzeniu jej ciągiem impulsów. Było to możliwe dzięki zaproponowaniu przez Niego zrównoleżenia obliczeń w oparciu o architektury wektorowe, uzupełnione o propozycje ulepszeń numerycznych. Osiągnięcie to będzie mieć istotne znaczenie dla uczenia innych klas sieci impulsowych, w tym także impulsowej wersji sieci syjamskich.
 4. Opracowanie impulsowej wersji sieci syjamskich oraz algorytmów ich uczenia traktuję jako kolejne ważne osiągnięcie, uzupełnione ważnym przykładem testowym, mianowicie, odróżnianiu na zdjęciach rzeczywistych, ważnych zjawisk astronomicznych od przypadkowych zakłóceń.
 5. Osiągnięciem które znacznie poszerza znaczenie i przydatność wyników opisanych w punktach 1)-4) jest opracowanie uogólnienie na przypadki wielowymiarowych danych zdarzeniowych. Oryginalna propozycja Mgr M. Pabiana polega na redukcji wymiaru danych w wyniku próbkowania zdarzeniowego.

Wymienione wyżej osiągnięcia, w mojej ocenie, z nadmiarem spełniają wymagania stawiane zwyczajowo i ustawowo rozprawom doktorskim.

UWAGI O CHARAKTERZE Dyskusyjnym

Nie mam uwag szczegółowych dotyczących redakcji rozprawy. Autor dołożył wielu starań, aby tak złożona i wielowątkowa problematyka została jasno przedstawiona. Chciałbym natomiast poznać opinię Doktoranta w następujących zagadnieniach związanych z tematyką rozprawy.

- A. Wśród interesujących rezultatów zwartych w Rozdziale 2. znajdujemy ten, który zinterpretować można jako zasadniczą niemożność uzyskania zbieżności jakości uczenia do ryzyka bayesowskiego, w przypadku gdy funkcja intensywności powstawania impulsów przyjmuje niezerowe wartości tylko w pewnym ograniczonym przedziale. Intuicyjne wyjaśnienie tego zjawiska wynika z niemożności zbierania rosnącej do nieskończoności liczby paczek nietrywialnych danych.
- Zdarzają się jednak takie procesy punktowe, które można byłoby nazwać repetycyjnych, które powtarzają się tylko w sensie probabilistycznych, z zachowaniem tej samej funkcji intensywności. Jak Doktorant ocenia możliwość poszerzenia swoich wyników na takie sytuacje?
- B. Wiele procesów zdarzeniowych dostarcza danych w postaci impulsów. Dla części jednak trzeba wybrać sposób kodowania danych. Przykłady tego rodzaju znajdujemy w kilku miejscach rozprawy, opatrzone uwagami iż efektywność uczenia zależy może od wybranego sposobu kodowania. Byłoby interesujące gdyby Doktorant zebrał i krótko przedstawił swoje przemyślenia i doświadczenia w tym zakresie.

Inne aspekty

Z bibliografii wynika, że Doktorant ma w dorobku co najmniej 4 publikacje współautorskie. Zawartość rozprawy wskazuje, że Doktorant jest kreatywny i ma zdolności wieloaspektowego podchodzenia do problemów badawczych. Mgr M. Pabian posiada szeroką wiedzę, w tym zwłaszcza w tematyce uczenia klasyfikatorów i różnych klas sieci neuronowych.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę moją wysoką ocenę osiągnięć zawartych w rozprawie Pana mgr Mateusza Pabiana, wymienionych w punktach 1)-5), stwierdzam, że Doktorant wniósł istotny wkład w rozwiązanie istotnych, ważnych problemów uczenia na podstawie danych zdarzeniowych. Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa Pana mgr Mateusza Pabiana spełnia wszystkie

wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (art. 187) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie chciałbym prosić Radę o rozpatrzenie wniosku o wyróżnienie tej rozprawy. Wniosek ten uzasadniam następująco. Rozprawa ta otwiera nowy, ważny nurt badawczy uczenia systemów z danymi zdarzeniowymi. Doktorant opracował nowe, ważne algorytmy w symulacji dynamicznych sieci neuronowych z ciągami impulsów na wejściu. Uzyskał ważne rezultaty teoretyczne odnośnie zbieżności algorytmów uczenia sieci pobudzanych impulsami pochodzącymi z procesów punktowych.

Pokazał równoległą drogą badania uczenia procesów zdarzeniowych w dziedzinie czasu, w tym sieci syjamskich, oraz uogólnił te rezultaty na przypadek wielowymiarowych procesów próbkowanych zdarzeniowo.

Wszystkie te algorytmy zostały bardzo starannie zbadane na przykładach rzeczywistych, z których część też sam opracował.

Wrocław 1 września 2024 roku

Prof. dr hab. inż. Ewaryst Rafajłowicz

