

RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Szymona Jakuba Busia
27 października 2023 roku o godzinie 12:00 w trybie hybrydowym

Temat rozprawy:

***„Zastosowanie statystyk opartych na różnicach między kolejnymi odstępami RR
w detekcji migotania przedsiionków z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego”***

Promotor: dr hab. inż. Konrad Jędrzejewski , prof. uczelni - Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Piotr Augustyniak - Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

dr hab. inż. Artur Klepaczek - Politechnika Łódzka

dr hab. inż. Paweł Pławiak, prof. uczelni – Politechnika Krakowska

Obrona odbędzie się w formie hybrydowej: w sali nr 229 (Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, ul. Nowowiejska 15/19, Warszawa) oraz na platformie MS Teams.
Osoby zainteresowane uczestnictwem zdalnym w obronie proszone są o wysłanie **do dnia 25.10.2023 r. godz. 18:00** zgłoszenia na adres sekretarza komisji, dr hab. inż.
Kajetany Marty Snopek: kajetana.snopek@pw.edu.pl

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Szymon-Jakub-Bus>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni

Streszczenie

W rozprawie przedstawiono wyniki badań dotyczących wykrywania migotania przedsionków (ang. *atrial fibrillation*, *AF*) na podstawie analizy parametrów zmienności rytmu serca (ang. *heart rate variability*, *HRV*) wyznaczanych z elektrokardiogramu (EKG).

Analizie poddano możliwość rozróżniania migotania przedsionków i rytmu zatokowego (ang. *sinus rhythm*, *SR*), czyli fizjologicznego, z użyciem pojedynczych standardowych parametrów HRV i prostego klasyfikatora progowego. Szczegółowo zbadano właściwości parametrów HRV z rodziny $pRRx$, określających, jaki procent odstępów RR (długości cykli pracy serca) różnił się od poprzedniego odstępu RR o co najmniej x milisekund. Wykazano, że próg zliczania x równy około 30 ms (parametr $pRR30$) pozwala na bardziej efektywną detekcję migotania przedsionków niż standardowy próg równy 50 ms (parametr $pRR50$).

Podobne analizy przeprowadzono dla grupy parametrów $pRRx\%$, zdefiniowanych jak parametry $pRRx$, z tą różnicą, że próg zliczania $x\%$ określa względną, a nie bezwzględną różnicę długości sąsiednich odstępów RR i jest wyrażony w procentach, a nie w milisekundach. Wykazano, że parametry $pRRx\%$ pozwalają na jeszcze skuteczniejszą detekcję migotania przedsionków niż parametry $pRRx$, szczególnie dla progów $x\%$ w zakresie 3-5% (parametry $pRR3\%$ - $pRR5\%$). Przeprowadzone badania dotyczące parametrów $pRRx$ i $pRRx\%$ są według wiedzy autora pierwszymi szczegółowymi analizami właściwości tych grup parametrów w kontekście detekcji migotania przedsionków.

Zbadano także wpływ długości badanego segmentu EKG na skuteczność detekcji migotania przedsionków. Wykazano, że dla EKG o długości od 30 do 300 sekund parametry $pRRx\%$ i $pRRx$ pozwalają na skuteczniejsze różnicowanie migotania przedsionków i rytmu zatokowego niż inne parametry HRV.

W dalszej części pracy zbadano metody wykrywania migotania przedsionków za pomocą algorytmów uczenia maszynowego przy użyciu niewielkich zbiorów odpowiednio dobranych parametrów HRV. Wykazano, że zastosowanie parametrów $pRRx\%$ lub $pRRx$ w modelach uczenia maszynowego pozwala na poprawę efektywności wykrywania migotania przedsionków lub na uproszczenie modeli (zmniejszenie liczby wykorzystywanych przez nie cech) przy jednoczesnym zachowaniu podobnej efektywności. Ograniczanie złożoności modeli uczenia maszynowego może być przydatne w przypadku implementacji algorytmów detekcji arytmii w przenośnych lub wszczepialnych systemach do monitorowania pracy serca, w których priorytetem jest minimalizowanie poboru mocy.

Słowa kluczowe: *migotanie przedsionków, zmienność rytmu serca, HRV, $pRRx$, $pRRx\%$, detekcja arytmii serca, uczenie maszynowe, elektrokardiogram, EKG*

Abstract

In this thesis, the results of the studies on detecting atrial fibrillation (AF) using heart rate variability (HRV) analysis of electrocardiogram (ECG) were presented.

The ability to differentiate atrial fibrillation (AF) from physiological (sinus) rhythm (SR) using single standard HRV parameters and a simple threshold classifier was analyzed. The properties of HRV parameters from the $pRRx$ group were analyzed in detail. These parameters are defined as the percentages of RR intervals (cardiac cycles) differing from the previous RR interval by at least x ms. The analysis showed that using the threshold value $x = 30$ ms ($pRR30$ parameter) allows for more effective detection of atrial fibrillation than using the standard 50 ms threshold ($pRR50$ parameter).

A similar analysis was conducted for a group of $pRRx\%$ parameters, defined like $pRRx$, but with a threshold $x\%$ measuring relative rather than absolute difference between consecutive RR intervals, and expressed in percentages rather than milliseconds. The experiments showed that the $pRRx\%$ parameters allow for even more effective detection of atrial fibrillation than $pRRx$, especially with thresholds $x\%$ in the 3-5% range ($pRR3\%$ - $pRR5\%$ parameters). The analyses of the $pRRx$ and $pRRx\%$ parameters are to the author's knowledge the first such detailed analyses of the diagnostic properties of these parameters in the context of atrial fibrillation detection.

The impact of the analyzed ECG's length on the effectiveness of atrial fibrillation detection was also investigated. It was shown that for 30-300 s ECG segments the $pRRx\%$ and $pRRx$ parameters are more effective in differentiating atrial fibrillation from sinus rhythm than other HRV parameters.

In the later part of the thesis the methods of atrial fibrillation detection using machine learning algorithms and small sets of selected HRV parameters were analyzed. It was shown that using $pRRx\%$ or $pRRx$ parameters in machine learning models allows for improving the effectiveness of atrial fibrillation detection or for simplifying the models (by reducing the feature set) while maintaining similar effectiveness. Reducing the complexity of machine learning models is especially important when implementing the arrhythmia detection algorithms in mobile or implantable cardiac monitors, where limiting the power consumption is a priority.

Keywords: *atrial fibrillation, heart rate variability, HRV, $pRRx$, $pRRx\%$, cardiac arrhythmia detection, machine learning, electrocardiogram, ECG*

dr hab. inż. Artur Klepaczko, prof. ucz.
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu 7.09.23r.
Numer.....

31 sierpnia 2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ INFORMATYKA TECHNICZNA I
TELEKOMUNIKACJA W POLITECHNICE WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: Zastosowanie statystyk opartych na różnicach między kolejnymi odstępami RR w detekcji migotania przedsionków z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego

Autor rozprawy: mgr inż. Szymon Buś

Promotor: dr hab. inż. Konrad Jędrzejewski, prof. ucz.

I. Ocena układu rozprawy, w tym informacja o jej poszczególnych częściach składowych. Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

Przedłożona do recenzji rozprawa obejmuje 6 rozdziałów oraz bibliografię. Układ rozdziałów jest przejrzysty. Autor w sposób spójny wyjaśnia cele, motywację, zastosowany aparat badawczy oraz wyniki kolejnych etapów badań. We wprowadzeniu zamieszczonym w rozdziale 1. jasno sformułowano problem naukowy, jakim jest znalezienie optymalnych parametrów HRV (ang. *heart rate variability*) do wykrywania migotania przedsionków w zapisie EKG. Tutaj też sformułowano tezy badawcze oraz określono w sposób syntetyczny wkład własny autora do dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Wkład ten potwierdzają zamieszczone w kolejnych rozdziałach wyniki badań.

Rozdziały 2. i 3. zawierają teoretyczne podstawy przeprowadzonych badań, jak również opis metod zastosowanych do wykonania postawionych zadań. Rozdziały 4. i 5. zawierają wszechstronną i wnikliwą prezentację uzyskanych wyników. W rozdziale 6. zamieszczono podsumowanie badań wraz z krytyczną oceną rezultatów i wskazaniem możliwych kierunków dalszych prac. Zarówno zawartość merytoryczna rozprawy, jak i jej logiczny układ świadczą o osiągnięciu przez Autora umiejętności do samodzielnego prowadzenia prac naukowych oraz pozyskania odpowiedniej wiedzy w dyscyplinie, w której realizowany jest doktorat, czego uzasadnienie zamieszczam w kolejnych sekcjach niniejszej recenzji.

II. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Tematyka badawcza podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej koncentruje się wokół zagadnienia rozpoznawania migotania przedsionków w zapisie elektrokardiograficznym (EKG) rytmu serca z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego. Migotanie przedsionków (ang. *atrial fibrillation*, AF) jest z jednej strony najczęstszym zaburzeniem rytmu serca polegającym na

szybkich, chaotycznych skurczach przedsionków. Według dostępnych statystyk problem ten dotyczy ok. 1% populacji przed 65 oraz 4-10% populacji powyżej 65 r.ż. Z drugiej strony choroba ta często przebiega w sposób bezobjawowy. Dlatego oraz ze względu na fakt, że migotanie przedsionków może prowadzić do groźnych powikłań zakrzepowo-zatorowych, wszelkie badania zmierzające do wytworzenia metod wspomagających diagnostykę tej arytmii mają duże uzasadnienie. Do tego celu autor rozprawy zastosował podejście oparte na klasyfikacji na podstawie pojedynczych parametrów lub wektorów cech wyznaczonych z sygnału EKG.

Opisane zagadnienie badawcze zostało dostatecznie jasno sformułowane przez Autora we wstępnej części rozprawy. W ramach pracy zaprojektowano algorytmy do ekstrakcji cech z sygnału EKG oraz przeprowadzono szereg eksperymentów klasyfikacji wektorów tych cech, których celem było potwierdzenie następujących tez badawczych:

1. Możliwe jest wyznaczenie progu zliczania x parametru $pRRx$ (procent odstępów RR różniących się od poprzedniego odstępu RR o co najmniej x ms) innego niż 50 ms ($pRR50$) pozwalającego na uzyskanie lepszych właściwości diagnostycznych w wykrywaniu migotania przedsionków niż parametr $pRR50$.
2. Możliwe jest wyznaczenie progu zliczania $x\%$ parametru $pRRx\%$ (procent odstępów RR różniących się od poprzedniego odstępu RR o co najmniej $x\%$ jego długości) pozwalającego na uzyskanie lepszych właściwości diagnostycznych w wykrywaniu migotania przedsionków niż parametr $pRRx$ o najlepszych właściwościach.
3. Zastosowanie parametrów $pRRx$ i $pRRx\%$ jako cech w modelach uczenia maszynowego pozwala na poprawę miar efektywności detekcji migotania przedsionków lub na zmniejszenie liczby cech w modelu przy zachowaniu podobnych miar efektywności detekcji migotania przedsionków.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny, w której Autor najpierw scharakteryzował istniejące algorytmy ekstrakcji cech sygnału EKG służące do wykrywania migotania przedsionków, następnie na podstawie przeprowadzonej analizy wywiódł podstawy teoretyczne do zdefiniowania parametrów optymalnych z punktu widzenia detekcji migotania przedsionków, zaś postawione tezy wykazał na drodze doświadczeń przeprowadzonych dla danych pozyskanych z dwóch niezależnych i publicznie dostępnych repozytoriów sygnałów EKG.

III. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy, świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W rozdziale 2. rozprawy p.t. *Wykrywanie migotania przedsionków* Autor omówił podstawy fizjologiczne pracy mięśnia sercowego, w tym przede wszystkim scharakteryzował aktywność elektryczną jego komórek będących źródłem sygnału elektrokardiograficznego, jak również samą metodę pomiaru tego sygnału za pomocą 12-odprowadzeniowego urządzenia stacjonarnego lub urządzeń przenośnych o mniejszej liczbie odprawień (tzw. holterów). Zwraca uwagę zwięzły aczkolwiek kompetentny opis cyklu pracy serca decydujący o takim, a nie innym przebiegu sygnału EKG, w którym wyróżnia się charakterystyczne wychylenia, tzw. załamki P, Q, R, S i T. Obecność tych załameków, a przede wszystkim ich oznaczenie w przebiegu sygnału ma istotne znaczenie diagnostyczne. Zasadniczą część pracy, zarówno w zakresie teoretycznym, jak i doświadczalnym, opiera się na prawidłowym wykryciu załamka R, będącego najwyższym punktem zespołu QRS odpowiadającego depolaryzacji komór. W podrozdziale 2.2 opisano

ponadto objawy migotania przedsionków oraz konsekwencje tej arytmii dla zdrowia człowieka. Co najistotniejsze z punktu widzenia rozprawy, w sposób przekonujący uzasadniono potrzebę automatyzacji i komputerowego wspomagania diagnostyki migotania przedsionków opartej o wielogodzinne zapisy EKG pozyskane przy pomocy urządzeń o mniejszej niż 12 liczbie wprowadzeń.

Podrozdział 2.3 zawiera opis podstawowej metody analizy sygnału EKG opartej o ilościowe miary zmienności rytmu serca. Znajdują się tu definicje parametrów statystycznych HRV stosowanych do oceny prawidłowości pracy mięśnia sercowego. Spośród wymienionych parametrów najważniejsze są miary $pRRx$ i $pRRx\%$, które oznaczają odpowiednio udział par kolejnych odstępów RR różniących się od siebie o x ms oraz $x\%$ długości w ogólnej liczbie odstępów RR w badanym fragmencie przebiegu EKG. Definicje oraz znaczenie tych miar wyjaśniono w sposób rzetelny, ułatwiając zrozumienie dokonania Autora.

Niedosyt pozostawia podrozdział 2.4, w którym Autor przechodzi do przeglądu literatury w zakresie metod detekcji migotania przedsionków w sygnale EKG. Podrozdział ten został podzielony na 2 części odpowiadające z jednej strony metodom, w których analizie poddawany jest jednocześnie cały sygnał EKG, w pełnym zmierzonym zakresie, z drugiej strony zaś metodom wykorzystującym parametry HRV. Pierwsza część obejmuje więc algorytmy, które z definicji stanowią inny kierunek badań niż przyjęty przez Autora, m.in. głębokie sieci neuronowe. Uczenie głębokie stanowi jednakże intensywnie rozwijaną technologię, co odzwierciedlone jest w znaczenie większej liczbie doniesień naukowych niż 3 pozycje (o nr 60-62) zamieszczone w spisie literatury. Bardzo pobieżna kwerenda w 2 czasopismach z wydawnictwa Elsevier zwraca kilkanaście artykułów odnoszących się do tej tematyki (kilka przykładów załączam poniżej).

Innym ważnym podejściem do analizy sygnałów EKG jest technika wykorzystująca transformatę falkową. Jest on stosowana zarówno w kontekście analizy całych zapisów EKG (jako metoda ekstrakcji cech), jak też do analizy zmienności rytmu HRV (np. do wstępnego przetwarzania sygnału czy jego filtracji). Transformata falkowa posiada poza tym szerokie zastosowanie w analizie sygnałów biomedycznych i wydaje się, że dyskusja nad jej potencjalnym wykorzystaniem do detekcji migotania przedsionków w sygnale EKG byłaby oczekiwana.

Również część rozdziału poświęcona metodom analizy HRV jest rozbudowująca. Ten fragment rozdziału ogranicza się jedynie do wskazania odniesień literaturowych (10-20), w których zastosowano parametry HRV. Brakuje tu szerszej dyskusji nt. tego, które parametry wykorzystano w poszczególnych badaniach, jakie zastosowano metody klasyfikacji, czy i w jaki sposób poddawano dane wejściowe przetwarzaniu wstępnemu, jakie są wady i zalety kolejnych podejść. Te informacje pozwoliłyby lepiej zweryfikować dokonania Autora rozprawy. W pewnym stopniu braki te rekompensuje podsumowanie zawarte w tabeli 2.3, jednak jest ono zbyt ogólne, skrótowe i ostatecznie wymagające od czytelnika samodzielnego wykonania syntezy stanu wiedzy. Poza tym na podstawie wykonanego przeglądu literatury nie można ocenić, czy analiza HRV posiada jakieś przewagi na pierwszą grupę metod opartych na analizie całych zapisów EKG i odwrotnie. Pozostaje pytanie, dlaczego ostatecznie Autor zdecydował się na drugie podejście, a odrzucił np. kierunek związany z metodami uczenia głębokiego.

Przykładowe propozycje dodatkowych pozycji do przeglądu literatury:

1. Yongjian Li et al. *Diagnosis of atrial fibrillation using self-complementary attentional convolutional neural network*, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 238, 2023, pp. 107565.

2. Sen Liu et al., MGNN: *A multiscale grouped convolutional neural network for efficient atrial fibrillation detection*, Computers in Biology and Medicine, Volume 148, 2022, pp. 105863.
3. Xianjie Chen et al. *Atrial fibrillation detection based on multi-feature extraction and convolutional neural network for processing ECG signals*, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 202, 2021, pp. 106009.
4. D.U.S. Duranta et al., *Enhancing Atrial Fibrillation detection accuracy: A wavelet transform filtered single lead ECG signal analysis with artificial neural networks and novel feature extraction*, Machine Learning with Applications, Volume 12, 2023, pp. 100472.
5. Pandey, S.K., et al. *Detection of Arrhythmia Heartbeats from ECG Signal Using Wavelet Transform-Based CNN Model*. Int. J. Comput. Intell. Syst. 16, 80 (2023).

IV. Czy autor rozwiązał poprawnie postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W rozdziale 3 rozprawy Autor opisał metody statystyczne oraz uczenia maszynowego wykorzystane później w przeprowadzonych eksperymentach. Rozdział ten świadczy o tym, iż Autor posiada duże kompetencje w zakresie eksploracji danych oraz opanował w stopniu zaawansowanym niezbędny warsztat narzędziowy – w szczególności statystycznych metod analizy danych – do wykonania zaplanowanych badań. Opis stosowanych miar statystycznej oceny jakości i wiarygodności testów diagnostycznych wydaje się wyczerpujący. Wybór metod klasyfikacji danych jest siłą rzeczy arbitralny, chociaż zawiera grupę algorytmów należących do kanonu uczenia maszynowego. Wśród nich chętnie widziałbym dodatkowo algorytm Xgboost, który – jeśli nie liczyć metod uczenia głębokiego – do niedawna stanowił jedno z bardziej aktywnie i z sukcesem rozwijanych podejść. Najbardziej jednak uszczuplonym jest wybór metod selekcji cech. Autor zdecydował się na użycie dwóch technik, czyli MRMR (ang. *minimum redundancy-maximum relevance*) należącej do podejścia typu *filtr*, oraz SFS (ang. *sequential forward selection*) należącej do podejścia typu *powłoka* (ang. *wrapper*). Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, że metoda SFS jest bardzo wrażliwa na wybór pierwszej cechy, co oznacza że wybór kolejnych cech znaczących jest zdeterminowany jakością tej pierwszej. Wady tej nie posiadają algorytmy SFFS lub SFBS (ang. *sequential floating forward/backward selection*), gdzie możliwe jest usunięcie ze zbioru kandydatów pierwszej cechy w toku kolejnych poszukiwań. Taki, a nie inny wybór metody selekcji cech ma konsekwencje dla końcowych wniosków rozprawy w zakresie wykorzystania metod uczenia maszynowego do predykcji migotania przedsionków.

W części doświadczalnej pracy opisaney w rozdziałach 4. i 5., Autor przeprowadził szereg badań w celu wykazania słuszności postawionych hipotez badawczych. W podrozdziale 4.1 zostały opisane 2 bazy danych sygnałów EKG wykorzystanych w badaniach – baza LTAfDB (ang. *long-term atrial fibrillation database*), zawierająca 84 24-godzinne zapisy próbkowane z częstotliwością 128 Hz, oraz baza AFDB (ang. *atrial fibrillation database*), zawierająca 23 10-godzinne zapisy z próbkowaniem 250 Hz. Obydwie bazy są dostępne publicznie jako otwarte repozytoria. Baza LTAfDB została wykorzystana jako zbiór treningowy, natomiast AFDB stanowiła zbiór testowy. Podział ten jest prawidłowy, zarówno ze względu na licznosc obydwu baz, jak też wyższą częstotliwość (a więc potencjalnie lepszą jakość spróbkowanego sygnału) bazy testowej. Jak zaznacza Autor, w pracy wykorzystano również istniejące w obydwu bazach oznaczenia załamekóv R. Wskazano w pracy, że celowo nie wykonano własnej implementacji algorytmów do przetwarzania sygnału EKG i wykrywania poszczególnych załamekóv, aby uniknąć ewentualnych błędów na tym polu. Argumentacja ta wydaje się kontrowersyjna. Zrozumiałe jest, że Autor pragmatycznie decyduje się na wykorzystanie gotowych adnotacji, jednakże założenie,

że samodzielnie wykonany program do oznaczania załamek byłby gorszy jest jedynie spekulacją. Z drugiej natomiast strony, jeśli zakładamy, że taka implementacja może być błędna, to należy zadać pytanie, **jakie Autor podjął środki, do oceny jakości użytych oznaczeń, jaki jest ich średni błąd i jakim ryzykiem w związku z tym obarczone są uzyskane wyniki badań.**

W podrozdziałach 4.2-4.4 przeprowadzono analizę statystyczną różnych grup parametrów HRV obliczanych dla 60-sekundowych fragmentów sygnału EKG w celu oceny ich zdolności do różnicowania migotania przedsionków i normalnego rytmu zatokowego. Analizie poddano kolejno standardowe parametry HRV wymienione w podrozdz. 2.3, parametry z grupy pRRx oraz z grupy pRRx%. W każdym przypadku procedura badawcza obejmowała zastosowanie podobnego zestawu narzędzi i metryk, tj. wyznaczenie krzywej ROC, na jej podstawie optymalnego progu odcięcia wg. kryterium Youdena, obliczenie wartości AUC, dokładności klasyfikacji (za pomocą prostego klasyfikatora progowego), czułości, swoistości, wartości PPV i NPV oraz diagnostycznego ilorazu szans DOR. Ponadto w przypadku oceny parametrów zliczeniowych pRRx i pRRx% wykonano analizę rozkładów dwóch klas (rytm zatokowy i migotanie) dla szeregu zakresów różnic x i $x\%$, tak aby wyznaczyć optymalne podzakresy, w których rozkłady te są rozłączne. Wszystkie te działania wykonano bardzo rzetelnie i zgodnie ze sztuką, a wyniki zaprezentowano w sposób czytelny i przekonujący. Na tej podstawie wykazano, że:

1. W grupie tzw. standardowych parametrów HRV, najlepsze właściwości różnicujące posiada parametr pRR50, zapewniając dokładność klasyfikacji bazy LTAfDB = 92,4%.
2. W grupie parametrów pRRx, najlepsze właściwości różnicujące wykazuje parametr pRR31 (dla $x = 31.25$ ms), zapewniając dokładność = 92,86%, czyli o 0,46% więcej niż parametr pRR50 (baza LTAfDB), **co dowodzi słuszności tezy 1.**
3. W grupie parametrów pRRx%, najskuteczniejszym okazał się parametr pRR3.25%, zapewniając dokładność = 95,44%, czyli o 2,58% więcej niż parametr pRR31 (baza LTAfDB), **co dowodzi słuszności tezy 2.**

Należy odnotować, że słuszność tez 1 i 2 stwierdzono nie tylko na podstawie pojedynczych eksperymentów klasyfikacyjnych, ale wykonano ich całą serię metodą *bootstrap* z 5000 powtórzeń. Następnie rozkłady wyników klasyfikacji dla analizowanych parametrów (np. pRR31 z pRR50, czy pRR3.25% z pRR31) porównano ze sobą za pomocą testu t-Studenta lub – w jednym przypadku – Wilcoxa, aby stwierdzić, czy obserwowane różnice dokładności są statystycznie wiarygodne. Działania te wykonano również w sposób prawidłowy, jednakże brakuje informacji **w jaki sposób przeprowadzono test normalności, czy też homogeniczności wariancji rozkładów wyników klasyfikacji, co jest zasadniczo warunkiem stosowalności testu t-Studenta.**

Wyniki analizy parametrów poddano także walidacji na zbiorze testowym AfDB. Badanie te potwierdziły, że znalezione parametry pRR31 i pRR3.25% pozwalają na skuteczną detekcję migotania przedsionków. Jedynym odstępstwem od tej obserwacji są wyniki czułości parametru pRR31, która dla zbioru testowego jest mniejsza niż w przypadku parametru pRR50. **Obserwacja ta nie została jednak skomentowana w pracy.**

W podrozdziale 4.5 przebadano wpływ długości fragmentu sygnału EKG na właściwości diagnostyczne parametrów HRV, przy czym w porównaniu wzięły udział wszystkie standardowe parametry oraz parametry pRR31 i pRR3.25%. Wykonano analizy dla fragmentów o długości od 30 do 300 sekund z krokiem co 10 s. Jak się okazało, wydłużanie segmentu sygnału ma pozytywny efekt na jakość klasyfikacji, jednak wszystkie najważniejsze metryki oceny, tj. dokładność, czułość, swoistość, AUC, czy DOR są w przybliżeniu „monotonicznie” rosnące tylko dla

parametrów z grupy pRRx i pRRx%. **Jednakże ta część badań pozostała bez rekomendacji, jaka długość w takim razie należałoby przyjąć jako pewien standard w tego rodzaju analizach.**

W rozdziale 5. rozprawy podjęto temat zastosowania metod uczenia maszynowego do rozpoznawania migotania przedsionków. Zaletą tej grupy metod jest oczywiście możliwość przeprowadzania analizy w wielowymiarowej przestrzeni cech. Badania przeprowadzono więc w grupie standardowych parametrów HRV, którą powiększono o parametry pRR31 i pRR3.25%. Wykonano tu szereg eksperymentów z użyciem różnych algorytmów klasyfikacji (k-NN, SVM, drzewa decyzyjne, lasy losowe, sztuczna sieć perceptronowa, komitet klasyfikatorów ADA-Boost). Wykazano, że najlepsze wyniki można otrzymać poprzez zestawienie ze sobą cech standardowych HRV z pRR31 albo pRR3.25%. W zależności od liczby cech, dokładność klasyfikacji wyniosła od 94 do 98% na zbiorze testowym, czyli o dalsze 4% więcej niż uzyskano w badaniach z użyciem tylko parametru pRR3.25%, **co dowodzi słuszności tezy 3.**

Z punktu widzenia tematyki pracy, która koncentruje się na aspekcie inżynierii cech, bardziej istotne jest jednak to, w jaki sposób wykonano wstępne przetwarzanie danych, w tym selekcję cech znaczących. **W tym zakresie, przyjęta metoda badawcza zawiera pewne mankamenty.** Przede wszystkim, nie jest uzasadnione uwzględnienie tylko parametrów pRR31 i pRR3.25% z grup pRRx i pRRx%. Nie jest wykluczone, że inne wartości różnic x i $x\%$ dają łącznie lepsze efekty detekcji niż standardowe parametry HRV. Ponadto, jak wskazałem wyżej, działanie algorytmu SFS jest silnie zdeterminowane przez wybór pierwszej cechy. Stąd kolejno dodawane parametry mogą nie mieć wpływu na ostateczny wynik klasyfikacji. Niekiedy, mniej znaczące cechy ujawniają swoją zdolność do dyskryminacji dopiero w otoczeniu innych parametrów. Nie jest więc zaskakujące, że w badaniach autora, algorytm MRMR, który istotność danej cechy ocenia w izolacji od innych parametrów zachowuje się bardzo podobnie do algorytmu SFS. Lepszym wydaje się wspomniany też wyżej algorytm SFS. Jednakże jeśli miałyby być włączone do analizy inne parametry z rodziny pRRx i pRRx%, nadto wyznaczone także z różnych długości fragmentów sygnału EKG, to SFFS mógłby się okazać podejściem zbyt czasochłonnym. Wówczas należałoby zastosować jeszcze inne metody przeszukiwania przestrzeni cech, jak choćby oparte o algorytmy genetyczne.

V. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Jak zaznacza Autor, wśród obecnie wykorzystywanych parametrów w diagnostyce migotania przedsionków na podstawie sygnału EKG znajduje się tylko jeden parametr z rodziny pRRx, tj. pRR50. Autor przeprowadził więc pogłębioną analizę stosowanych parametrów HRV oraz parametrów z grup pRRx i pRRx% dla szeregu różnych wartości różnic x i $x\%$, a także dla różnych długości fragmentów sygnału EKG. Wykonał także treningi modeli uczenia maszynowego do klasyfikacji wielowymiarowych wektorów cech HRV do rozpoznawania migotania przedsionków w sygnale EKG. Jako główne oryginalne osiągnięcie Autora wskazałbym przede wszystkim analizę właściwości diagnostycznych parametrów pRRx%, ponieważ parametry te nie były szczegółowo badane w literaturze. Autor zauważa, że zastosowanie miar pRRx% do różnicowania migotania przedsionków i rytmu zatokowego może być korzystne ze względu na to, iż wariancja ciągów RR tylko w tym drugim przypadku jednoznacznie rośnie wraz ze wzrostem długości odstępów RR. Na tej podstawie wysnuł i potwierdził nieoczywistą hipotezę, że także sąsiednie odstępy RR różniące się o mniej niż standardowe 50 ms, lub wyznaczone w innym eksperymencie optymalne 31 ms, ale jednak o więcej niż $x\%$ długości, gdzie $x\%$ zostało wyznaczone

eksperymentalnie, stanowi przesłankę do zaklasyfikowania danego przebiegu jako potencjalnej arytmii AF. Jak zaznaczono w II sekcji recenzji, przegląd literatury światowej w tematyce rozprawy zawiera jedynie pobieżny spis alternatywnych rozwiązań bez ich pogłębionej dyskusji. Porównanie osiągnięć naukowych Autora na tle literatury światowej jest wobec tego utrudnione. Przeprowadzone badania Autor podsumował we współautorskich artykułach i referatach naukowych (w tym trzech publikacji w czasopiśmie *Journal of Clinical Medicine* o współczynniku IF=3.9) opublikowanych w latach 2020–2023.

VI. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych wyników i ich interpretacji (zwięzłość, jasność)?

Autor opisał swoje osiągnięcia badawcze na odpowiednim poziomie szczegółowości stawianym rozprawom doktorskim. Doktorant przeprowadził również szeroką dyskusję uzyskanych wyników. Tekst rozprawy, poza pojedynczymi nielicznymi błędami językowymi wskazanymi w cz. VI niniejszej recenzji, w sposób jasny, przekonujący i uporządkowany przedstawia kolejne etapy badań. Czytelnik ma duży komfort w zapoznawaniu się z osiągnięciami Autora.

VII. Ocena możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań.

Detekcja i predykcja migotania przedsionków, jak wskazano w niniejszej recenzji oraz w samej rozprawie, stanowi bardzo ważne zagadnienie w wymiarze społecznym. Dlatego praktyczna implementacja algorytmów detekcji opartych na zidentyfikowanych przez autora parametrach HRV z grupy pRRx i pRRx% ma potencjalnie duże znaczenie dla zwiększenia skuteczności testów diagnostycznych. Z tego względu należy bardzo pozytywnie ocenić informacje o nawiązaniu współpracy przez Instytut Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej z firmą Medea – polskim producentem rejestratorów EKG – oraz wstępne prace prowadzone przy udziale Doktoranta zmierzające do zaprojektowania przenośnego rejestratora wyposażonego w zaproponowane przez niego algorytmy detekcji migotania przedsionków. W tym kontekście na uznanie zasługuje również fakt, iż prowadzone badania były konsultowane ze środowiskiem medycznym, co jest udokumentowane we wspólnych publikacjach z zespołem prof. Przemysława Guzika z Katedry i Kliniki Intensywnej Terapii Kardiologicznej i Chorób Wewnętrznych Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu.

VIII. Jakie są słabe strony rozprawy i ewentualnie jej główne wady?

Praca jest napisana w sposób bardzo poprawny. Do jej słabszych stron można zaliczyć:

- 1) Brak pogłębionej analizy przestrzeni cech pRRx i pRRx% w kontekście projektowania modeli uczenia maszynowego.
- 2) Brak wykonania normalizacji lub standaryzacji cech przed selekcją cech znaczących.
- 3) Brak szerszej dyskusji w przeglądzie literatury światowej.
- 4) Brak porównania wyników uzyskanych za pomocą wytrenowanych modeli klasyfikatorów z opublikowanymi pracami o podobnej tematyce.
- 5) Drobną wadą w dowodzie słuszności tezy 1 – czułość testu diagnostycznego opartego o parametr pRR31 dla zbioru testowego okazała się trochę mniejsza niż dla parametru pRR50.

Język tekstu rozprawy nie budzi zastrzeżeń i można go uznać za wzorcowy. Można doszukać się jedynie nielicznych błędów o małej wadze:

- a) s. 20: Jeśli pierwszy z nich jest dłuższy (przyspieszenie pracy serca), punkt znajdzie się poniżej linii $y = x$, zaś w przeciwnym wypadku (zwolnienie) – ponad nią. Słowo wypadek w języku polskim oznacza nagle, często nieszczęśliwe zdarzenie. Powinno być ...w przeciwnym przypadku...
- b) s. 19/20: Z tego względu w całodobowej rejestracji EKG u osoby zdrowej oczekiwane są okresy zarówno **niskiej**, jak i stosunkowo **wysokiej** częstości pracy serca. (...) również wartości HRV w migotaniu przedsionków powinny być **wyższe** niż w rytmie zatokowym. Przymiotniki wysoki, niski odnoszą się do wysokości (np. budynku) lub czyjegoś wzrostu. W przypadku wartości wielkości fizycznych używa się kategorii mały, duży, a zatem małej częstości, większe wartości.
- c) s. 12: **Jednak** ze względu na fakt, że w migotaniu przedsionków praca serca jest nieregularna, większość parametrów HRV przyjmuje podczas migotania przedsionków inne wartości niż podczas rytmu zatokowego. Słowo jednak najchętniej występuje wewnątrz zdania: Ze względu na fakt, że w migotaniu przedsionków praca serca jest nieregularna, większość parametrów HRV przyjmuje **jednak** podczas migotania przedsionków inne wartości niż podczas rytmu zatokowego. Podobnie s. 18, 19, 59.
- d) s. 79: Celem analiz było zweryfikowanie, czy użycie parametru pRR3.25%, **mającego** lepsze... Powinno być: **mającego**.

Wniosek końcowy

Na podstawie niewątpliwych osiągnięć badawczych Autora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, do której wniósł oryginalny wkład badawczy stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 z późn. zm. oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Szymona Busia do publicznej obrony.

Artem Ulepekin

Prof. dr hab. inż. Piotr Augustyniak
Katedra Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej
Akademia Górniczo-Hutnicza
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
august@agh.edu.pl

Kraków, 13. 07. 2023

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu...19.07.2023r.
Numer.....

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana magistra inżyniera Szymona Busia zatytułowana: *"Zastosowanie statystyk opartych na różnicach między kolejnymi odstępami RR w detekcji migotania przedsionków z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego"*. Recenzja jest sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej na podstawie uchwały nr 473/2023 z dnia 23.05.2023 i przedstawiona pismem z dnia 10.07.2023. Recenzowana rozprawa została napisana w 2023 roku pod kierownictwem pana dr. hab. inż. Konrada Jędrzejewskiego.

1. Zawartość rozprawy

Przedstawiona rozprawa jest napisana w języku polskim i składa się z Wprowadzenia, 4 rozdziałów, Podsumowania i spisu bibliograficznego. Wstęp poprzedzają podziękowania oraz spis treści i wykaz skrótów. We wstępie autor przedstawia sformułowanie problemu badawczego, nakreśla cel i tezy dowodzone przez badania opisywane w rozprawie, wymienia najważniejsze elementy wkładu własnego i prezentuje układ pozostałej części rozprawy.

W rozdziale drugim opisano epidemiologię i pojęcia dotyczące migotania przedsionków. Znajdują się tam podstawowe informacje na temat elektrokardiografii, opis migotania przedsionków (AF), metod analizy zmienności rytmu serca (HRV) oraz dwóch aktualnie stosowanych i rozwijanych metod wykrywania AF. Przeprowadzone badania istniejącego stanu nauki w zakresie metod automatycznej detekcji AF Autor przedstawia w formie tabeli. Rozdział trzeci, 'warsztatowy', jest poświęcony omówieniu metod analizy statystycznej i uczenia maszynowego wykorzystanych w prezentowanych badaniach. Opisano tu testy diagnostyczne stosowane w medycynie oraz sposoby oceny ich wyników. Zwraca uwagę opis rzadziej wykorzystywanego diagnostycznego ilorazu szans, który w dalszych rozważaniach okazuje się bardzo przydatny. Przedstawiono wybrane algorytmy uczenia maszynowego służące do klasyfikacji oraz do selekcji cech, a także sposoby oceny modeli uczenia maszynowego.

W rozdziale czwartym przedstawiono analizy właściwości diagnostycznych parametrów HRV w zastosowaniu do detekcji AF. W pierwszej części rozdziału przedstawiono wyniki analizy standardowych parametrów HRV, w drugiej – grupę parametrów pRRx, a w trzeciej – grupę parametrów pRRx%. Wbrew praktyce medycznej, zliczanie względnych zmian pRRx% wydaje się lepsze, gdyż uniezależnia wynik statystyczny od rytmu serca. Ostatnia, czwarta część przedstawia wyniki badań wpływu długości analizowanego epizodu AF na właściwości diagnostyczne parametrów HRV zastosowanych do detekcji migotania przedsionków.

W rozdziale piątym przedstawiono i omówiono wyniki przeprowadzonych przez Autora badań dotyczących detekcji AF przy użyciu modeli uczenia maszynowego wykorzystujących

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Szymona Busia

parametry HRV. Wyniki analiz opisane w rozdziale 4 posłużyły do wstępnej selekcji parametrów HRV używanych w modelach uczenia maszynowego. W szczególności wybrano parametry z grup pRRx i pRRx% pozwalające na najbardziej efektywne różnicowanie AF i rytmu zatokowego (normalnego). W rozdziale piątym przedstawiono także wyniki badań wpływu różnych czynników, takich jak liczba parametrów HRV jednocześnie uwzględnianych przez model i długość analizowanego epizodu AF na skuteczność jego detekcji.

Rozprawę zamyka podsumowanie zawierające wnioski, odniesienie do postawionych tez badawczych oraz krytyczną analizę ograniczeń proponowanych metod i proponowane kierunki dalszych badań. Rozprawa zawiera spis bibliograficzny, w którym uwzględniono wszystkie najważniejsze doniesienia istotne dla prowadzonych badań: 128 pozycji, w tym 8, których pierwszym autorem jest Kandydat.

2. Znaczenie dokonań Autora dla rozwoju dyscypliny

Z radością witam podjęcie przez Kandydata tematyki detekcji AF. Jest to tematyka ważna zarówno ze względu na rozpowszechnienie się AF w starzejącym się społeczeństwie (struktury zapewniające prawidłowy automatyzm serca nie nadążają za wzrastającą długowiecznością człowieka), jak i ze względu na następstwa: (1) podczas AF wydajność serca jest gorzej kontrolowana przez autonomiczny system nerwowy (ANS), a do tego (2) w nieregularnie kurczących się przedsionkach dochodzi do powstawania skrzepów krwi, które mogą być przyczyną zatorów zarówno mózgu jak i serca a w ostrej postaci prowadzić do nagłego zgonu. Ciekawe, że wykorzystując metodykę analizy HRV standardowo używaną dla oceny rywalizacji pobudzania i hamowania rytmu serca przez ANS, Kandydat zaproponował skuteczny detektor AF oparty jedynie na interwałach międzyuderzeniowych. W stosunku do konkurencyjnej metody, w której Kandydat także ma własne dokonania, bazującej na odtwarzaniu fali migotania, zaproponowana metoda ma dwie zasadnicze zalety: (1) jest oparta na łatwych do detekcji załawkach R i (2) jest możliwa do zaadaptowania w nieelektrycznych pomiarach tętna takich jak fotopletyzmografia. Najważniejszymi osiągnięciami Autora rozprawy są:

- Wyniki analizy właściwości statystycznych i diagnostycznych rodzin parametrów pRRx i pRRx% na potrzeby detekcji AF w sygnale EKG i wskazanie optymalnych parametrów w obrębie każdej z rodzin.
- Wyniki analizy właściwości standardowych parametrów HRV na potrzeby detekcji AF i wskazanie jak właściwości te zależą od długości epizodu AF.
- Zbadanie wpływu liczby parametrów HRV użytych w modelach uczenia maszynowego na wyniki detekcji migotania przedsionków.
- Przeprowadzenie analizy wpływu zastosowania parametrów pRRx% i pRRx w modelach uczenia maszynowego do detekcji AF i wykazanie poprawy efektywności detekcji wynikającej z ich zastosowania.

Podczas realizacji badań Autor opracował i zaimplementował autorskie oprogramowanie automatyzujące przeprowadzane analizy. Część oprogramowania służąca do analizy właściwości parametrów pRRx i pRRx% (wraz z kodem źródłowym w języku Python) została udostępniona jako publiczne repozytorium otwierając drogę przyszłym zespołom badawczym. Rozprawa ma charakter implementacyjny, a przeprowadzone badania mogą przynieść konkretne zastosowania praktyczne.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Szymona Busia

Rozprawa prezentuje szeroką wiedzę jej autora dotyczącą zagadnień związanych z elektrofizjologią serca oraz statystyką. Cztery problemy wymienione powyżej jako najważniejsze osiągnięcia są zagadnieniami badawczymi, dla których autor znalazł oryginalne rozwiązanie. Ponadto, stanowczo dobrym pomysłem jest wykorzystanie innej bazy w roli ucząco-walidacyjnej, a innej w roli testowej. Jestem głęboko przekonany, że badania prowadzone we wskazanych przez Kandydata kierunkach: (1) detekcji większej liczby typów arytmii i (2) transfer części doświadczeń do dziedziny nieelektrycznych pomiarów tętna upowszechnią regularne analizy przesiewowe i umożliwią na tyle wczesne wykrywanie sytuacji sprzyjającej tworzeniu się skrzepów żeby zapobiec ryzyku zatorów. Warto zauważyć, że prace naukowe Kandydata, także te, stanowiące główny temat rozprawy były przedmiotem publikacji naukowych w czasopismach o zasięgu światowym oraz wystąpień na konferencjach międzynarodowych.

Główne osiągnięcia Autora idealnie wpisują się w dyscyplinę inżynieria biomedyczna, w której uznałbym je za znaczące. Można je także uznać za znaczące w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja (zgodnie z otrzymanym zleceniem), w której lokowane są rozmaite zastosowania informatyki, w tym niekiedy medyczne.

3. Zagadnienia do dyskusji

Rozprawa w zasadzie nie ma dostrzegalnych mankamentów. Za najpoważniejszy uważam (str. 39) Decyzję o wykorzystaniu oznaczeń załamków R z baz danych. Kardiologiczne bazy danych nie były konstruowane z myślą o dokładności wykrywania załamków R. Z praktyki wiadomo, że wskazywane punkty, odpowiadające pozytywnym detekcjom nieraz różnią się od maksimum R, poza tym, punkt max R może wypadać w różnych chwilach w jednoczasowych odprowadzeniach, różnica zależy m. in. od analizowanych odprowadzeń i morfologii (dla morfologii nadkomorowej to nie będzie miało znaczenia). Decyzja ta, moim zdaniem błędna niesie za sobą szereg konsekwencji, o których M. IN. chciałbym podyskutować na obronie::

- (str. 21): Parametry diagnostyczne HRV różnią się między sobą złożonością obliczeniową, co jest istotne w zastosowaniach nasobnych przy dużej liczbie interwałów RR; szkoda, że w Tab. 2.1 nie znalazło się oszacowanie złożoności, może Autor zechciałby zaprezentować uzupełnioną tabelę na obronie?
- (str. 52): Baza LTAFDB jest próbkowana z okresem 7.8125 ms, co przy rytmie 72 bpm (czyli okresie 833 ms) stanowi 0,94% interwału międzyuderzeniowego. Jaki jest zatem sens wyznaczania serii względnych progów zliczania z krokiem 0,25% ? Poproszę o analizę błędu związanego z kwantyzacją interwału próbkowania i jego wpływu na wyznaczanie interwału międzyuderzeniowego i dokładność zliczeń.
- (str. 61): Wśród parametrów (rys. 4.26 i nast.) można wyróżnić takie, które stabilizują się po 90 s długości sygnału i pozostałe (w tym pRR3.25), które nadal wzrastają. Czy ten wzrost nie jest spowodowany kwantyzacją interwału próbkowania? Moim zdaniem wzrost związany z długością sygnału wynika z większej liczby różnych wartości interwałów i bardziej statystycznym rozkładem ich dopasowania do progu zliczeń. Poproszę o przedstawienie zdania Autora.
- (str. 81) Dlaczego Autor, pierwotnie dostrzegając korelację w zbiorze cech używanych do detekcji migotania przedsionków, nie utworzył nowego zbioru cech, w którym

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Szymona Busia

korelacja byłaby ograniczona (np. metodą PCA); użycie mniejszej liczby prawie niezależnych cech mogłoby poprawić wynik klasyfikacji.

- (str. 84) Nie ma tabelki odpowiadającej ładnym wykresom (rys. 5.24 i nast.), a szkoda, tym niemniej wydaje się, że w niektórych konfiguracjach parametrów wydłużenie analizowanego zapisu przynosi gorsze wartości parametrów, poproszę o komentarz, ew. wskazanie prawdopodobnej przyczyny.

Pozostałe komentarze i uwagi:

- Pod względem edytorskim praca napisana jest poprawnym językiem polskim, usterki językowe zdarzają się, ale są rzadsze niż w innych podobnych pracach (przykłady: str. 20, 6 linia od dołu 'przybliżona' zamiast 'przybliżoną'; str. 90, 3 linia od dołu 'efektywność' zamiast 'efektywności'. Kilkakrotnie (np. str. 21 w Tab. 2.1) użyto kropki zamiast przecinka w roli separatora dziesiętnego. W przedostatnim wierszu Tab. 2.1 zamiast 'very low frequency' powinno być 'high frequency'.
- Staranność i przejrzystość rysunków stanowczo należą do mocnych stron rozprawy.
- Na str. 17 można było opisać dokładniej, że migotanie przedsionków tworzy powtarzającą się i nieregularną akcję szybkiej depolaryzacji przedsionków i losowe przewodzenie pobudzeń do komór. Z opisu tego mechanizmu dobitnie wynika, że zaproponowana metoda może być (i jest) skuteczna.
- Na str. 19 przydałoby się wyjaśnienie, że HRV stosowana do oceny wpływu autonomicznego systemu nerwowego na rytm serca posługuje się pojęciem pNN (uwzględniając odstęp jedynie pomiędzy pobudzeniami zatokowymi), natomiast jej użycie do analizy arytmii takich jak AF powoduje uwzględnienie wszystkich pobudzeń, czyli pRR.
- Na str. 34. Oprócz redundancji autorzy klasyfikatorów wyróżniają i chętnie wybierają cechy bezparametrowe, czyli takie, które nie wymagają tuningu, co uniezależnia je od zbioru uczącego
- Na str. 39. W pracy nie poruszono problemu zrównoważenia baz danych (balancing), ale baza AFDB jest tylko nieznacznie niezrównoważona.
- Na str. 93. Skrót PWV oznacza prędkość fali tętna, poza tym trudności rejestracji i szereg czynników oddziałujących pomiędzy aktywnością elektryczną serca a falą tętna sprawia, że perspektywy zastosowania PPG w detekcji arytmii nie są, moim zdaniem, aż tak optymistyczne, jak przedstawia Autor.

Wymienione zagadnienia dyskusyjne i pozostałe uwagi nie umniejszają osiągnięcia naukowego, a moje spostrzeżenia formułuję tu przede wszystkim w celu wykorzystania ich przez Kandydata do poprawy Jego przyszłych publikacji.

4. Wniosek końcowy

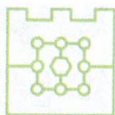
Kandydat poprawnie sformułował i rozwiązał problem naukowy istotny z punktu widzenia potencjalnych zastosowań badań elektrofizjologicznych serca i komputerowych metod wsparcia prewencji zatorów tętniczych mózgu i serca. Uczestniczył w pracach interdyscyplinarnej grupy badawczej, w wyniku których wspólnie opublikował szereg prac w czasopiśmie o zasięgu światowym. Siedmiokrotnie był pierwszym autorem, co zwyczajowo sugeruje, że publikowane badania opierały się na jego propozycjach. Do rozwiązania postawionego problemu Autor stosuje przede wszystkim narzędzia

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Szymona Busia

informatyczne, dzięki czemu jego osiągnięcie może być zaliczone do dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.

Przedstawiona rozprawa doktorska zatytułowana: „*Zastosowanie statystyk opartych na różnicach między kolejnymi odstępami RR w detekcji migotania przedsionków z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego*”, spełnia wszystkie wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478) Art. 186 i 187 w zakresie nadawania stopnia naukowego doktora. Recenzent wnioskuje do Komisji **o dopuszczenie rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Szymona Busia do publicznej obrony.**





dr hab. inż. Paweł Pławiak, prof. PK i IITIS PAN Kraków, dn. 22.09.2023 r.
Katedra Informatyki,
Wydział Informatyki i Telekomunikacji,
Politechnika Krakowska,
Warszawska 24, 31-155 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej

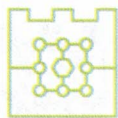
mgr inż. Szymona Busia

***pt.: „Zastosowanie statystyk opartych na różnicach między kolejnymi
odstępami RR w detekcji migotania przedsionków z wykorzystaniem
metod uczenia maszynowego”***

Promotor: dr hab. inż. Konrad Jędrzejewski

Praca doktorska Pana mgra Szymona Busia została wykonana na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem Pana dra hab. inż. Konrada Jędrzejewskiego. Tematyka rozprawy obejmuje temat zastosowania statystyk oraz wykorzystania uczenia maszynowego do detekcji migotania przedsionków. Autor w rozprawie skupił się na różnicach między kolejnymi odstępami RR.

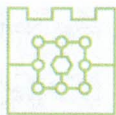
Dysertacja zawarta jest na 105 stronach. Rozpoczyna się od wprowadzenia opisującego problem, cel i tezy, wkład autora oraz układ pracy. W kolejnych dwóch rozdziałach są omówione teoretyczne aspekty wykrywania migotania przedsionków oraz wykorzystanych w pracy metod analizy statystycznej i uczenia maszynowego. W kolejnych dwóch rozdziałach Autor opisuje część praktyczną rozprawy dotyczącą analizy właściwości diagnostycznych parametrów zmienności rytmu serca oraz wykorzystania tych parametrów do wykrywania migotania przedsionków przy użyciu algorytmów uczenia maszynowego. Bibliografia zawiera 128 pozycji, które zostały dobrane prawidłowo, ze znajomością prezentowanego zagadnienia.



Manuskrypt dobrze opisuje metodykę badawczą Doktoranta oraz pozwala na prześledzenie przyjętych w rozprawie hipotez badawczych definiujących cele dysertacji. Przedstawiony układ jest bardzo czytelny, poszczególne problemy są dobrze przedstawione oraz hipotezy badawcze są precyzyjnie zdefiniowane. Wyniki i ich dyskusja przedstawione są przejrzysto, a wnioski odnoszą się do postawionych hipotez badawczych. Podsumowanie zwięźle konkluduje założone cele wraz ze wskazaniem kierunków przyszłych badań i ograniczeń.

Badania Autora przedstawione w rozprawie zostały opisane w następujących 7 publikacjach:

1. S. Buś, K. Jędrzejewski i P. Guzik, "Statistical and Diagnostic Properties of pRRx; Parameters in Atrial Fibrillation Detection," Journal of Clinical Medicine, t. 11, nr. 19, s. 5702, sty. 2022. DOI: 10.3390/jcm11195702; MEiN = 140 pkt., IF = 3.9.
2. S. Buś, K. Jędrzejewski i P. Guzik, "A New Approach to Detecting Atrial Fibrillation Using Count Statistics of Relative Changes Between Consecutive RR Intervals," Journal of Clinical Medicine, t. 12, nr. 2, s. 687, sty. 2023. DOI: 10.3390/jcm12020687; MEiN = 140 pkt., IF = 3.9.
3. S. Buś, K. Jędrzejewski i P. Guzik, "Impact of Electrocardiogram Length on Diagnostic Properties of Heart Rate Variability Indices in Atrial Fibrillation Detection," w 2022 12th Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations (ESGCO), paź. 2022, s. 1–2. DOI: 10.1109/ESGCO55423.2022.9931356.
4. S. Buś, K. Jędrzejewski i P. Guzik, "Comparison of Effectiveness of Heart Rate Variability Indices in Differentiation of Atrial Fibrillation from Sinus Rhythm," w 2023 Signal Processing Symposium (SPSymposium), Zaakceptowano dn. 2023-04-28, IEEE, 2023.
5. S. Buś, K. Jędrzejewski i P. Guzik, "Using Minimum Redundancy Maximum Relevance Algorithm to Select Minimal Sets of Heart Rate Variability



Parameters for Atrial Fibrillation Detection,” Journal of Clinical Medicine, t. 11, nr. 14, s. 4004, sty. 2022. DOI: 10.3390/jcm11144004; MEiN = 140 pkt., IF = 3.9.

6. S. Buś, K. Jędrzejewski i P. Guzik, “A Study on Selection of HRV-based Features for Different Classifiers in Atrial Fibrillation Detection,” w 2021 Signal Processing Symposium (SPSymo), IEEE, 2021, s. 31–34. DOI: 10.1109/SPSymo51155.2020.9593769.
7. S. Buś, K. Jędrzejewski, T. Krauze i P. Guzik, “Feasibility Study on the Use of Heart Rate Variability Parameters for Detection of Atrial Fibrillation with Machine Learning Techniques,” w 2020 Signal Processing Workshop (SPW), IEEE, 2020, s. 11–16. DOI: 10.23919/SPW49079.2020.9259140.

Na pozytywną uwagę zasługuje fakt, że we wszystkich wymienionych publikacjach Doktorant jest pierwszym autorem, niestety nie został podany dokładany wkład własny.

Z 7 publikacji trzy zostały opublikowane w czasopiśmie MDPI Journal of Clinical Medicine za 140 pkt. z IF = 3.9, a reszta to referaty konferencyjne co może budzić lekki niedosyt.

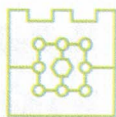
Niestety nie został podany całosciowy dorobek publikacyjny Autora. W bazie Scopus widnieje 12 dokumentów Autora (3 artykuły i 9 konferencji), niestety zainteresowanie tymi pracami jest niskie o czym świadczy sumaryczna liczba cytowań wynosząca 18 oraz indeks Hirscha równy 3. Podobnie w bazie Web of Science znajduje się 10 dokumentów, cytowanych sumarycznie 8 razy, a indeks Hirscha wynosi 2.

Głównymi celami pracy było:

- przeprowadzenie analizy właściwości statystycznych i diagnostycznych parametrów zmienności rytmu serca HRV w kontekście wykrywania migotania przedsionków,
- znalezienie parametrów HRV z grup pRRx i pRRx% pozwalających na najskuteczniejsze wykrywania migotania przedsionków,
- zbadanie wpływu zastosowania parametrów HRV z grup pRRx i pRRx% w modelach uczenia maszynowego na efektywność wykrywania migotania przedsionków.

Na podstawie przytoczonych celów sformułowano następujące hipotezy:

- Możliwe jest wyznaczenie progu zliczania x parametru pRRx (procent odstępów RR



różniących się od poprzedniego odstępu RR o co najmniej x ms) innego niż 50 ms (pRR50) pozwalającego na uzyskanie lepszych właściwości diagnostycznych w wykrywaniu migotania przedsionków niż parametr pRR50.

- Możliwe jest wyznaczenie progu zliczania $x\%$ parametru pRR $x\%$ (procent odstępów RR różniących się od poprzedniego odstępu RR o co najmniej $x\%$ jego długości) pozwalającego na uzyskanie lepszych właściwości diagnostycznych w wykrywaniu migotania przedsionków niż parametr pRR x o najlepszych właściwościach.
- Zastosowanie parametrów pRR x i pRR $x\%$ jako cech w modelach uczenia maszynowego pozwala na poprawę miar efektywności detekcji migotania przedsionków lub na zmniejszenie liczby cech w modelu przy zachowaniu podobnych miar efektywności detekcji migotania przedsionków.

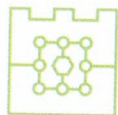
Doktorant sformułował następujące wnioski płynące z wyników jego badań:

Podsumowując, Autor rozprawy doktorskiej udowodnił postawione tezy. Otrzymane wyniki potwierdzają słuszność prowadzonych badań i dowodzą, że jest możliwe jest wyznaczenie progu parametrów pozwalających na lepsze właściwości diagnostyczne i efektywniejsze wykrywanie migotania przedsionków.

Przedstawione wyniki analiz, co bardzo istotne, mają potencjał wykorzystania w praktyce. Planowana jest współpraca z polską firmą Medea celem zaimplementowania algorytmów na przenośny rejestrator sygnału EKG, holterowskim SiliconBeat 12.

Do pracy nie mam poważnych uwag merytorycznych, chciałbym tylko poprosić o wyjaśnienie kilku aspektów:

- Jaki był dokładny podział danych na zbiory uczące, walidacyjne i testowe? Ile sygnałów i od których pacjentów znalazło się w poszczególnych zbiorach również w walidacji krzyżowej?
- W jaki sposób (jakimi metodami) była przeprowadzona optymalizacja hiperparametrów klasyfikatorów?
- Jak uzyskane wyniki prezentują się na tle innych prac naukowych? Brak tabeli z porównaniem uzyskanych wyników klasyfikacji do prac innych autorów.



Rozprawa napisana jest poprawną polszczyzną, tekst sformułowany jest jasno. Pojedyncze literówki i błędy stylistyczne nie pomniejszają jakości doktoratu. Uzyskane wyniki są ciekawe, wartościowe i nowatorskie, a ich publikacja stanowi istotny wkład w literaturę tematu. Praca spełnia kryteria rozprawy doktorskiej i stanowi samodzielne rozwiązanie problemu naukowego przez Doktoranta.

Wniosek Końcowy:

W końcowej ocenie z przekonaniem stwierdzam, iż praca doktorska **mgr inż. Szymona Busia** *pt.: „Zastosowanie statystyk opartych na różnicach między kolejnymi odstępami RR w detekcji migotania przedsionków z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego”* odpowiada warunkom określonym w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 o tytule naukowym i stopniach naukowych (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789 z późn. zmianami) oraz zapisom ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. Zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej **mgr inż. Szymona Busia** do publicznej obrony i dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Paweł Pławiak

dr hab. inż. Paweł Pławiak, prof. PK i IITiS PAN

