

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sandry Magdaleny Śmigiel

pt. „Wybrane metody przetwarzania i analizy sygnałów elektrokardiograficznych w zastosowaniach telemedycznych”.

Promotor: prof. dr hab. inż. Tomasz Stefan Topoliński,
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Andrysiak, prof. Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo prof. dr. hab. inż. Marka Gzika, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej z dnia 04.07.2022 roku (RDIB.002.29.2022), informującego o powołaniu mnie przez ww. Radę na recenzenta rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Sandry Magdaleny Śmigiel.

1. Tematyka, cele i tezy rozprawy

Tematyka pracy dotyczy przetwarzania sygnałów EKG, w szczególności: kompresji danych celem uzyskania nowej reprezentacji informacji, detekcji zespołów QRS w 12-odprowadzeniowym pomiarze EKG, klasyfikacji sygnałów EKG celem predykcji chorób serca. Badania realizowane były w kontekście przygotowywanego rozwiązania telemedycznego. Tematyka jest aktualna i bezpośrednio związana z inżynierią biomedyczną oraz aplikacyjnymi aspektami elektroniki i informatyki.

Autorka rozprawy zaproponowała szereg ciekawych algorytmów związanych z przedstawioną tematyką, które zweryfikowała metodą eksperymentalną.

Pani mgr inż. Sandra Magdalena Śmigiel przedstawiła następującą tezę (str. 11): „Możliwe jest zastosowanie algorytmu Orthogonal Matching Pursuit w kompresji i klasyfikacji sygnału

elektrokardiograficznego, na potrzeby IoT". Przedstawiona teza jest interesująca, niemniej skonstruowana zbyt ogólnie. OMP stosowano już wcześniej w aspektach związanych z kompresją i klasyfikacją EKG (np.: Yong Ting Li et al., 2012, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.1305>, Qin Tan et al., 2010, <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2010.520>, T. Andrysiak, 2016, <https://doi.org/10.1080/08839514.2016.1193720>, P. Dohnalek et al., 2014, https://doi.org/10.1007/978-3-319-01854-6_21) zatem jest możliwe zastosowania OMP do wskazanych celów. Doktorantka sformułowała jednak dalej pięć celów badawczych oraz dziewięć zadań badawczych, które są wystarczającą szczegółową i precyzyjną.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawę napisano w języku polskim. Składa się z dziesięciu rozdziałów, bogatej bibliografii (275 pozycji) oraz szeregu załączników.

W rozdziale pierwszym Doktorantka przedstawia kontekst pracy, definiuje tezę, cele i zadania badawcze.

Drugi rozdział skupia się na wprowadzeniu do podstawowych zagadnień związanych z elektrokardiografią i sygnałów EKG w kontekście medycznym (diagnostycznym).

Kolejne trzy rozdziały, tj. 3, 4 i 5 również mają charakter wprowadzenia do tematyki badawczej i skupiają się na ogólnym opisie metod przetwarzania i analizy sygnałów EKG (rozdział 3), na pomiarze i transmisji sygnałów EKG w kontekście aplikacji telemedycznych (rozdział 4) oraz na ogólnym podsumowaniu stanu wiedzy (bardzo krótki rozdział 5).

Rozdział szósty przedstawia koncepcję rozwiązania telemedycznego demonstrując i opisując schematy ideowe (oraz płytki PCB) 3-kanalowego rejestratora EKG z możliwością przetwarzania i transmisji danych (LoRa). Doktorantka jest współautorką rozwiązania (zgłoszenie patentowe P.427680).

W rozdziale siódmym Pani mgr inż. Sandra Magdalena Śmigiel opisuje elementy metodologii badawczej związanej z eksperymentalnym charakterem pracy. Przedstawia stosowane bazy danych, algorytmy bazowe (m.in. OMP), stosowane technologie (Python, itp.) oraz metryki oceny dotyczące proponowanych algorytmów kompresji danych, detekcji zespołu QRS jak i klasyfikacji danych w rozpoznawaniu chorób serca.

Rozdziały 8 i 9 stanowią główną część pracy związaną z oryginalnymi osiągnięciami Doktorantki. Autorka szczegółowo przedstawia proponowane algorytmy: algorytm kompresji danych z wykorzystaniem OMP, algorytm detekcji załamka R wykorzystujący agregację wyników znanych detektorów tego załamka oraz różne algorytmy związane z klasyfikacją danych EKG. W tym ostatnim przypadku przedstawia autorskie metody wyznaczania nowej reprezentacji informacji, głównie poprzez agregację wyników danych z OMP oraz zespołów QRS dla 12-odprowadzeniowego EKG. W rozdziale dziewiątym Doktorantka szczegółowo ilustruje i omawia uzyskane wyniki z szeregu eksperymentów. Prezentuje bardzo dużą kolekcję tablic zawierających wyniki opisanych wcześniej metryk w ocenie jakości efektów zaproponowanych metod.

Ostatni rozdział, 10, stanowi podsumowanie rozprawy, w którym Pani mgr inż. Sandra Magdalena Śmigiel zestawia oryginalne osiągnięcia swoich prac oraz opisuje perspektywy dalszych prac w rozważanej tematyce badawczej.

Rozprawa jest poprawie skonstruowana i właściwie uporządkowana. Prezentowane treści są w większości czytelnie przedstawione. Nieliczne uwagi krytyczne w tym zakresie dotyczą zbyt małego rozmiaru czcionki w tekście niektórych rysunków (np. 17, 19, 33, 38, 39, 73, 74). Ponadto, czytelność niektórych ilustracji można byłoby zwiększyć stosując większy kontrast pomiędzy kolorem tła, a kolorem tekstu (np. w przypadku czarnego tekstu na niebieskim tle, np. rys. 32, 40, 44, 45, itd.). Edycji wymagałby w mojej ocenie wykaz ważniejszych oznaczeń zaprezentowany na początku pracy wprowadzając jednolitą formę wyjaśnień (aktualnie część wyjaśnień jest w języku polskim, część zawiera nazwy w języku angielskim, a inna część przedstawia wyjaśnienia w obu językach). Nie jest również dla mnie jasne, dlaczego autorka stosuje zapis „bit per index” czy „bit per coef” zamiast „bits per index” czy „bits per coef”. Te drobne niedociągnięcia czy elementy wymagające potencjalnej edycji nie umniejszają jednak całości dobrze zredagowanej treści rozprawy.

3. Oryginalne osiągnięcia i ocena merytoryczna rozprawy

Do głównych osiągnięć rozprawy zaliczam opracowanie i weryfikację algorytmów przetwarzania sygnałów EKG w kontekście potencjalnych zastosowań telemedycznych, w szczególności:

O1: zaproponowanie algorytmu kompresji sygnałów EKG, bazującego na wyznaczeniu współczynników stanowiących efekt algorytmu OMP i wykazanie zakresu kompresji i jakości rekonstruowanych sygnałów,

O2: zaproponowanie algorytmu detekcji załamka R, poprzez agregację wyników znanych detektorów, stosując agregację wyników z wykorzystaniem algorytmu k-means i wykazanie skuteczności detekcji tych załamków wraz z metodą wyodrębniania fragmentów EKG zawierających zespoły QRS,

O3: zaproponowanie metod generacji nowych reprezentacji danych stanowiących agregację współczynników OMP dla 12-odprowadzeniowego EKG wraz z fragmentami EKG zawierającymi zespoły QRS i metadanymi oraz wykazanie ich znaczenia w problemie klasyfikacji danych w zadaniu rozpoznawania chorób serca w licznie przeprowadzonych eksperymentach dla różnych modeli klasyfikacji danych,

O4: zaproponowanie koncepcji urządzenia dedykowanego pomiarom EKG, ich przetwarzaniu i transmisji danych głównie w ramach protokołu komunikacji bezprzewodowej dalekiego zasięgu o małej mocy (LoRa) i ograniczonej szybkości transmisji danych.

W zakresie osiągnięć O1-O3 Doktorantka przeprowadziła szereg właściwie zaprojektowanych eksperymentów bogato ilustrując uzyskane wyniki. Osiągnięcie O4 wyznacza bardziej kontekst pracy dotyczący konieczności poszukiwania efektywnych, skompresowanych reprezentacji danych dla potrzeb telediagnostyki.

Wymienione osiągnięcia są bezpośrednio związane z dyscypliną inżynierii biomedycznej oraz powiązane z aplikacyjnym charakterem informatyki i elektroniki. Autorka opublikowała szereg prac (czasopisma indeksowane przez WoS i punktowane przez MEN) powiązanych

tematycznie z rozprawą, odnosząc się do wyników tych badań w treści rozprawy. Również współautorskie zgłoszenie patentowe zasługuje na podkreślenie, stanowi bowiem osiągnięcie o charakterze częściowo konstrukcyjnym, tak ważnym w inżynierii biomedycznej.

Oceniając rozprawę dostrzegam jednak pewne braki czy niedoskonałości omówione w kolejnym punkcie.

4. Uwagi krytyczne i pytania do Doktorantki

Główne osiągnięcia pracy dotyczą algorytmów przetwarzania sygnałów dla 12-odprowadzeniowego EKG, podczas gdy zaprojektowane urządzenie to aparat bazujący na 3-odprowadzeniowym EKG. Pojawia się tutaj istotne pytanie dotyczące właściwie zdefiniowanego kontekstu pracy, a właściwie założeń, których nie sformułowano precyzyjnie w rozprawie (np. w rozdziale 1.2, praktycznie nie wymieniono założeń). Przykładowo, jeśli ze względu na ograniczenia urządzenia pomiarowego (np. wydajność zasilania, liczba kanałów, złożoność obliczeniowa/pamięciowa, szybkość transmisji, itp.) czy samej procedury aplikacyjnej (zdolność pacjenta do właściwego podłączenia i lokalizacji elektrod) możliwy będzie pomiar jedynie z 3 kanałów to jakie w tym kontekście ma znaczenie opracowanie algorytmu wykrywającego załamek R na podstawie 12 kanałów? Innym przykładem związany z brakiem precyzyjnego wskazania założeń dotyczy szybkości transmisji danych. Zakładając określone ograniczenie w tym zakresie (np. jako wypadkowa możliwości LoRa w danej konfiguracji) można byłoby dokonać stosownej analizy wymagań w zakresie kompresji danych z porównaniem do stanu wiedzy, tj. wskazując w jakim zakresie aktualnie znane metody kompresji nie są adekwatne, itd.

Autorka rozprawy dokonała bardzo wielu analiz co zasługuje na podkreślenie i pochwałę. Niemniej, wadą pracy jest zbyt uboga dyskusja osiągnięć i wyników w odniesieniu do aktualnego stanu wiedzy. Doktorantka wskazuje, że trudno jest bezpośrednio porównać opracowane metody z wynikami innych zespołów (poza własnymi publikacjami). Oczywiście, że precyzyjne porównanie może być utrudnione, ponieważ wiele algorytmów czy metod posiada pewne różne założenia, itp. Niemniej warsztat naukowca obejmuje dyskusję własnych wyników z rezultatami innych podobnych prac z wskazaniem stosownych różnic. Przykładowo, na stronie 125 Doktorantka zamyka porównanie własnych wyników metod klasyfikacji danych do rezultatów innych zespołów praktycznie w dwóch zdaniach: „Modele zaproponowane w pracach [41], [95], [144], [158], [233] dla bazy PTB-XL osiągnęły najwyższe wyniki metryk na poziomie odpowiednio ACC=0,9080, F1=0,866, ACC=0,8417, ACC=0,9699, ACC=0,8490. Autorzy zdecydowali się w ich przypadku na zastosowanie głębokich sieci neuronowych, w tym kontekście głównie CNN (np. z ResNet) czy LSTM.”. Warto przykładowo wskazać, że np. pozycja [233] (wersja opublikowana: Nils Strodthoff et. al., 2020, <https://doi.org/10.1109/JBHI.2020.3022989>) powstała w 2020 roku (opublikowana wstępnie w arxiv.org) i przedstawia wyniki klasyfikacji sygnałów z bazy PTB-XL dla 8 modeli sieci neuronowych dla różnej liczby klas od 5 do 71. W przypadku 5 klas są to te same klasy, które wykorzystywała Doktorantka. Autorzy uzyskali dla siedmiu modeli wynik AUC powyżej 0,92. Pani mgr inż. Sandra Magdalena Śmigiel wskazuje ACC=0,849, który stanowił najgorszy wynik nie ACC, ale AUC z wszystkich, uzyskany dla 71 klas, dla konfiguracji Wavelet+NN, tabela I publikacji w IEEE (chyba, że w innej wersji tej pracy lub innym miejscu Autorka znalazła wskazywany wynik dokładności). Co więcej, autorzy omawianej wyżej przykładowej pracy

opublikowali w 2020 roku kody źródłowe (https://github.com/helme/ecg_ptbxl_benchmarking) napisane w języku Python, umożliwiając innym zespołom odtworzenie prac i bezpośrednie porównanie wyników. Podsumowując, Doktorantka powinna bardziej szczegółowo odnieść się do stanu wiedzy pokazując wyniki i poddając dyskusji podobieństwa i różnice pomiędzy pracami i wynikami w określonym kontekście.

Dostrzegłem również prawdopodobne, drobne błędy związane z implementacją wybranych algorytmów w kodzie źródłowym, prezentowanym w załącznikach do rozprawy.

W L1, prezentującym kod źródłowy funkcji kompresji o nazwie *compress*, Autorka najpierw normalizuje współczynniki przez maksymalną wartość: $coef2 = coef / den$, a następnie sprawdza czy wartość *den* nie jest większa od 255. Jeśli jest większa, to obcina ją do 255. Tak obcięta wartość jest zapisywana w strumieniu bitów wykorzystywanym później w dekompresji (mnożenie przed *den*). Jeśli *den* może być większe od 255 to wydaje się, że kolejność powinna być odwrotna: najpierw obcięcie, później normalizacja (tak, aby w dekompresji uzyskać te same wartości). Ponadto zastosowanie funkcji *astype(int)* obcina wartość z części po przecinku. Czy to było celem konwersji wartości typu *float* na *int*? W procedurze kwantyzacji często stosuje się zaokrąglenie (np. $floor(coef / den + 0.5)$)

W L5 w funkcji *forward()* klasy *PoolConvLayers* występuje pierwsza instrukcja $X_data, X_signal = x$ (nie wiadomo czym jest małe „x”). Prawdopodobnie jest to błąd edycyjny. Ponadto w klasie *PoolConvolutionNet* jest odwołanie do klasy *PoolLayers*: $self.pool = PoolLayers(n_inputs)$. Nie ma załączonej definicji tej klasy – prawdopodobnie jest to błąd edycyjny i chodzi o klasę *PoolConvLayers*. Przy okazji warto zauważyć, że liczba cech uzyskanych z zespołów QRS w części splotowej wynosi zaledwie 26 (2*13). Natomiast łącznie z pozostałymi cechami (metadane i wynik OMP) to 1530 wartości (*ConvolutionNet*) lub 2704 wartości (*PoolConvolutionNet*). Ta dysproporcja jest bardzo dziwna. Zwykle w sieciach splotowych dąży się do ekstrakcji większej liczby cech kosztem wymiaru czasowego/przestrzennego, natomiast Doktorantka w ostatniej warstwie splotowej zredukowała liczbę kanałów z 96 do 2 (i stąd 2*13 cech). Jest to o tyle dziwne, że w prezentowanych wynikach (tabele 25-28) w problemie klasyfikacji dwóch klas najlepszy wynik uzyskano, gdy zastosowano jedynie cechy z sygnału EKG i metadane (bez OMP). Szkoda zatem, że autorka nie wskazała szczegółowej analizy demonstrującej czy zwiększenie liczby cech uzyskiwanych z warstwy splotowej pozwoliłoby zredukować potrzebę stosowania innych danych. Co więcej, wyniki w tabelach 25-28 różnią się bardzo nieznacznie. Przykładowo w tabeli 28 największa różnica to 0,004. W pozostałych tabelach największa różnica wartości ACC to 0,019. Autorka wskazuje, że w tabelach są pokazane wartości średnie. Jak charakteryzował się zatem rozrzut wyników (np. przedziały ufności, odchylenia standardowe, itp.). Czy różnice uzyskiwane dla różnych słowników i modeli danych są istotne statystycznie?

Autorka przeprowadziła bardzo bogate badania eksperymentalne dokumentując szereg szczegółowych wyników. Prezentując macierze pomyłek Doktorantka wskazuje wyniki dla najlepszych modeli (rys. 72, 73 oraz R5 i R6 – w tekście jest pomyłka odsyłająca do rysunków w załączniku R1-R2). Nie wskazuje jednak, które to modele (ich konfiguracje, np. tak jak we wcześniejszych tabelach).

Podsumowując stwierdzam, że pomimo pewnych braków czy potencjalnych drobnych błędów praca jest wartościowa i oceniam ją pozytywnie. Przy tak dużej ilości eksperymentów łatwo o pomyłki. Nie wpływają one jednak istotnie na końcowe osiągnięcia Doktorantki.

Pytania do autorki rozprawy:

- P1: Czy w tabeli T1 wartość MSE wszędzie wynosiła 0,00, czy jedynie ograniczono precyzję prezentacji wartości MSE? Dlaczego nie zastosowano popularnych metryk stosowanych w pracach poświęconych kompresji EKG bazujących na procentowej zmianie RMS (percentage RMS difference: PRD i powiązanych)?
- P2: Czy przeprowadziła Pani badania dla większej liczby cech pozyskiwanych z fragmentów sygnałów EKG, a jeśli tak to jakie były wyniki w odniesieniu do sensowności stosowania współczynników z OMP czy metadanych?
- P3: Proszę o wyjaśnienie jaką uzyskiwano dynamikę wartości dla wyznaczanych wartości średnich ACC prezentowanych w tabelach 25-28. Czy uzyskiwane różnice wartości dokładności dla wskazanych słowników i modeli danych są istotne statystycznie?
- P4: Większość opracowanych algorytmów bazuje na 12-odprowadzeniowym EKG. Proszę o wyjaśnienie możliwości wykorzystania tych metod w przypadku zastosowania urządzenia 3-kanalowego oraz ewentualną szansę realnego wykorzystania urządzenia z pomiarem 12-odprowadzeń w warunkach telemedycznym.

5. Konkluzja recenzji

Podsumowując, stwierdzam, że postawione cele i zadania badawcze zostały osiągnięte, metody badawcze właściwie dobrane i zastosowane, a eksperymenty w większości należycie przeprowadzone. Drobne uchybienia w pracy nie pomniejszają istotności osiągnięć i oryginalności rozwiązania dla przyjętego problemu naukowego. Rozprawa wskazuje na ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktorantki w obszarze inżynierii biomedycznej z aspektami elektroniki i informatyki. Autorka rozprawy wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej wnioski z recenzji, uważam, że rozprawa mgr inż. Sandry Magdaleny Śmigiel spełnia warunki określone w Ustawie – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora.


dr hab. inż. Jacek Rumiński, prof. PG
Katedra Inżynierii Biomedycznej, ETI, PG