

Recenzja

pracy doktorskiej mgr. inż. Szymona Siecińskiego

pt. „Analiza zmienności rytmu pracy serca na podstawie elektrokardiogramów, sejsmokardiogramów i żyrokardiogramów”

1. Tematyka, cele i tezy rozprawy

Tematyka pracy jest aktualna, łączy w sobie istotne problemy w zakresie diagnostyki medycznej oraz zagadnienia dotyczące automatycznej analizy sygnałów biomedycznych we wspomaganie procesu diagnostyki. Postęp technologiczny zwiększył dostępność miniaturowych akcelerometrów czy żyroskopów umożliwiając potencjalnie powszechne ich zastosowanie również w diagnostyce medycznej czy prewencji w obszarze zdrowia. Dlatego prace w zakresie analizy dokładności metod pomiarowych w sejsmokardiografii i żyrokardiografii są bardzo cenne. Tematyka ta dotyczy ocenianej rozprawy doktorskiej, dla której zdefiniowano następujący cel:

„opracowanie algorytmów detekcji uderzeń serca w sygnałach EKG, SKG i ŻKG oraz przeprowadzenie badań nad użytecznością analizy zmienności rytmu serca na sejsmokardiogramach i żyrokardiogramach zarejestrowanych na tych samych badanych oraz porównanie uzyskanych współczynników HRV z wynikami uzyskanymi na elektrokardiogramach” (str. 2 i 3 rozprawy).

W rozprawie przedstawiono jedną tezę:

„wyniki analizy zmienności rytmu serca na podstawie sejsmokardiogramów i żyrokardiogramów nie różnią się istotnie od wyników uzyskanych na podstawie elektrokardiogramów i można ustalić czas otwarcia zastawki aortalnej.”

Pierwsza część przedstawionej tezy jest sformułowana w sposób jasny. Druga część zaproponowanej tezy, ze względu na brak wyraźnie zdefiniowanych założeń, wydaje się niezbyt precyzyjna, nie jest bowiem wiadome co jest odniesieniem wyznaczenia czasu otwarcia zastawki.

2. Zawartość rozprawy

Praca złożona jest z 5 rozdziałów. Pierwszy rozdział stanowi wstęp do pracy, w którym zdefiniowano cel pracy oraz jedną tezę pracy. Rozdział 2 jest wprowadzeniem do problematyki zmienności rytmu pracy serca, elektrokardiografii, sejsmokardiografii i żyrokardiografii. Autor omówił podstawowe zagadnienia związane z definiowaniem i rolą diagnostyczną zmienności rytmu serca. Krótko przedstawił podstawowe metody analizy zmienności rytmu serca bazujące na analizie w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz metody czasowo-częstotliwościowe. Wskazał szereg klasycznych deskryptorów zmienności rytmu serca dla analizy w dziedzinie czasu czy częstotliwości. Wartości tych

deskryptorów wyznaczał później w swoich badaniach przedstawionych w dalszej części rozprawy. Zwięźle i ciekawie przedstawił zagadnienia dotyczące pomiaru i opisu deskryptorowego sygnałów w sejsmokardiografii i żyrokardiografii. Przedstawione opisy bazują na aktualnym stanie wiedzy, bogato cytowanym w tym rozdziale. W kolejnym rozdziale doktorant przedstawił charakterystykę materiału badawczego oraz istotne elementy metodologii badawczej. Omówił bazę „Mechanocardiograms with ECG reference”, która stanowiła zasadniczy zbiór sygnałów jakie wykorzystał doktorant w analizie parametrów zmienności rytmu. Baza udostępnia 29 zestawów pomiarowych. Ponadto przedstawił opracowany rejestrator EKG, SKG i ŻKG, który wykorzystał do pomiarów sygnałów dla 16 ochotników. Niestety z powodu „niskiej jakości elektrokardiogramu” do późniejszych prac doktorant wybrał jedynie 6 zestawów pomiarowych. W dalszej części rozdziału trzeciego mgr inż. Szymon Sieciński opisuje metody detekcji uderzeń serca w EKG (znany algorytm Pana-Tompkinsa w implementacji Daniela Wadekinda w Matlabie) oraz w SKG i ŻKG (znany algorytm z prac Tadi i wsp.). Do analizy parametrów HRV doktorant zastosował znany środowisko PhysioNet Cardiovascular Signal Toolbox. Podsumowując metodologię w zakresie analizy sygnałów przedstawioną w rozdziale trzecim, doktorant bazował na znanych wcześniej algorytmach i ich implementacjach. W rozdziale 4. zatytułowanym „Wyniki” autor najpierw przedstawił elementy metodologii badań porównawczych (m.in. definicję różnic pomiędzy porównywanymi odstępami RR czy AO-AO, dopasowanie modeli gęstości rozkładu wartości do danych, zastosowanie metody korelacyjnej, itp.). Następnie doktorant przedstawił wyniki analizy HRV (wartości deskryptorów dla nakładających się okien sygnału i dla całych sygnałów) oraz wyniki korelacji uzyskanych deskryptorów dla poszczególnych technik pomiarowych EKG, SKG i ŻKG. Wyniki zilustrował dużą ilością wykresów (korelacja, wykresy Blanda-Altmana) i omówił wyniki przeprowadzonych analiz. Ostatni rozdział pracy, rozdział piąty, podsumowuje pracę, przedstawiając krótkie streszczenie wyników, dyskusję z wynikami innych zespołów wraz z deklaracją o wykazaniu słuszności przyjętej tezy. Ponadto do rozprawy załączono dwustronicowy dodatek A przedstawiający algorytm detekcji wartości maksymalnych w falach AO i gj. Rozprawa cytuje 234 pozycje źródłowe powiązane z tematyką pracy oraz wskazuje 11 publikacji doktoranta, 10 związanych z tematyką rozprawy (których doktorant jest pierwszym autorem). Rozprawa jest dobrze uporządkowana strukturalnie, a prezentowane treści są przedstawione w większości w sposób czytelny i łatwy do lektury.

3. Oryginalne osiągnięcia i ocena merytoryczna rozprawy

Osiągnięcia

Do głównych oryginalnych osiągnięć autora zaliczam:

- a) wykazanie, że wartości parametrów zmienności rytmu serca uzyskane zarówno w żyrokardiografii jak i sejsmokardiografii są dla zdrowych osób wysoce podobne, umożliwiając praktyczną analizę zmienności rytmu z wykorzystaniem analizy sygnałów SKG czy ŻKG,
- b) wykazanie, że przyjęta w algorytmie detekcji fali AO wartość odstępu czasowego od załamka R przebiegu EKG wynosząca 100ms jest wystarczająca, a uzyskiwane rzeczywiste wartości różnic odstępów R-R vs. AO-AO dla SKG i ŻKG są w 99% mniejsze niż 100ms (dla SKG <67ms, dla ŻKG <74ms),
- c) pośrednie wykazanie, że dla zdrowych osób możliwy jest pomiar zmienności mechanicznego rytmu serca poprzez równoczesny pomiar i analizę sygnałów EKG i SKG/ŻKG, ponieważ w następstwie pobudzenia elektrycznego serca (QRS) możliwy jest wiarygodny pomiar fal powstających w wyniku mechanicznej odpowiedzi serca na pobudzenie elektryczne.

Warto podkreślić, że uzyskane wyżej osiągnięcia wynikają z przeprowadzenia eksperymentów na największym zbiorze danych spośród tych, wskazywanych w tematycznie zbliżonych pracach w literaturze.

Przyjętym przez doktoranta celem było opracowanie algorytmów detekcji uderzeń serca dla sygnałów EKG, SKG i ŻKG oraz analiza zmienności rytmu serca. Druga część celu została w pełni osiągnięta i związana jest bezpośrednio z pierwszą częścią tezy jak i oryginalnymi osiągnięciami wskazanymi powyżej.

Doktorant wykazał się dużą znajomością metod przetwarzania i analizy sygnałów biomedycznych. W tym zakresie zastosował lub dostosował algorytmy zaimplementowane w środowisku Matlab m.in. do:

- detekcji załamka R w sygnale EKG,
- detekcji wartości maksymalne w fali AO/gj odpowiednio w sygnałach SKG i ŻKG,
- wyznaczenia wartości 15 parametrów reprezentujących zmienność akcji serca dla wszystkich 3 klas sygnałów biomedycznych,
- wyznaczenia różnic badanych odstępów dla SKG i ŻKG względem referencyjnych sygnałów EKG oraz zbadania charakteru rozkładu wartości tych różnic badając trzy różne funkcje rozkładu gęstości prawdopodobieństwa,
- wyznaczenia podobieństw wyznaczonych wartości pomiarowych z zastosowaniem analizy korelacyjnej oraz z użyciem wykresów Bland-Altmana.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że doktorant podjął próbę zaprojektowania i realizacji eksperymentalnego urządzenia pomiarowego do równoległego pomiaru EKG, SKG i ŻKG, stosując efektywne kosztowo rozwiązanie, dzięki czemu powstałe urządzenie mogłoby być potencjalnie stosowane powszechnie. Wykorzystane urządzenie częściowo zweryfikował dokonując pomiarów z udziałem 16 ochotników. Część pomiarów wykorzystał w dalszej analizie łącząc je z zestawami sygnałów dostępnymi w wykorzystanej bazie danych.

Wartościową częścią pracy jest szczególnie opis uzyskanych wyników. Autor bogato udokumentował osiągnięte wyniki analiz przedstawiając liczne zestawienia tabelaryczne oraz wykresy ilustrujące także wyniki analizy porównawczej (korelacja, wykresy Bland-Altmana). Szereg wyników prowadzonych prac przedstawił i opublikował w materiałach konferencji kluczowych dla inżynierii biomedycznej, co świadczy o tym, że doktorant nabył stosowne kompetencje oraz że jego prace spotkały się z zainteresowaniem i naukową akceptacją różnych środowisk w obszarze inżynierii biomedycznej.

Uwagi krytyczne

1. Osiągnięcie celu rozprawy

Jak wspominałem wcześniej, cel prac obejmował również opracowanie algorytmów detekcji uderzeń serca dla sygnałów EKG, SKG i ŻKG. Uważam, że doktorant nie osiągnął w pełni tego celu, gdyż wykorzystane w pracy algorytmy są metodami znanymi z literatury, co autor jasno stwierdza w swojej pracy. Do detekcji załamek R stosuje zmodyfikowany algorytm Pana-Tompkinsa dostępny w wykorzystanej przez niego implementacji w środowisku Matlab. Niemniej doktorant opisując oryginalny algorytm Pana-Tompkinsa (cytując ich pracę z 1985 roku, poz. 147 literatury) podając przebieg poszczególnych etapów pomija etap wyznaczenia pochodnej sygnału przed obliczeniem kwadratu sygnału. Brak tego etapu jedynie w opisie jest pomijalnym uchybieniem. Do detekcji wartości maksymalnej fali AO czy gj doktorant używa prostego algorytmu zaproponowanego przez Tadi i wsp. (pozycja 193 w spisie literatury). Doktorant przyznaje, że wykorzystuje ten algorytm z podanego źródła. Precyzuje jedynie wartości parametrów tego algorytmu, tj. określa szerokość okna uśredniania sygnału na 15ms (w artykule źródłowym 10-20ms) oraz wartość okna poszukiwania maksimum fali AO względem załamka R na 100ms (względem 90ms przyjętego w artykule źródłowym). Mgr inż. Szymon Sieciński opisuje zastosowany algorytm dodatkowo w załączniku do rozprawy nazwanym Dodatek A. Wydaje się, że w pseudokodzie zapisanym w 10 wierszach popełnia drobny błąd powtarzając operację przypisania pozycji maksimum sygnału z wiersza 8 w wierszu 9. Jest:


```
8) AO_positions <- [AO_positions pos+QRS_position[j]];
9) AO_values <- [AO_values pos+QRS_position[j]];
```

a powinno być chyba:

```
9) AO_values <- [AO_values val];
```

Inaczej operacje 8 i 9 w przedstawionym przez doktoranta pseudokodzie dadzą identyczny wynik (tablice AO_positions i AO_values mają te same wartości).

Podsumowując, dyplomant wykorzystał znane algorytmy detekcji uderzeń serca dla sygnałów EKG, SKG i ŻKG (co jasno wskazuje) wprowadzając jedynie nieznaczące zmiany. Dlatego uważam, że część celu pracy zapisana jako „opracowanie algorytmów detekcji uderzeń serca dla sygnałów EKG, SKG i ŻKG” można jedynie interpretować jako dostosowanie lub wykorzystanie algorytmów a nie opracowanie nowych algorytmów (lub istotnie zmodyfikowanych).

Ponadto uważam, że doktorant powinien zbadać znaczenie dobranych parametrów stosowanych algorytmów (np. dlaczego 15ms a nie 20ms, dlaczego 100ms a nie 90ms, itd.).

2. Teza rozprawy

Pierwsza część tezy została bezpośrednio udowodniona. Druga część tezy mówiąca o „*można ustalić czas otwarcia zastawki aortalnej*” nie została udowodniona bezpośrednio, tzn. brak jawnego toku dowodzenia opisanego w rozprawie. Określenie momentu otwarcia zastawki aortalnej stosunkowo łatwo ustalić poprzez badanie USG, co w odniesieniu do sygnałów EKG i ŻKG zostało zbadane i udokumentowane m.in. przez Tadi i wsp. w pracy z 2017 roku (poz. 197 spisu literatury). Można wówczas określić czas otwarcia zastawki aortalnej zakładając na podstawie tego rodzaju badań, że fala AO czy gj reprezentuje w sygnale SKG i ŻKG aktywność zastawki aortalnej, a wyznaczenie czasu wystąpienia stosownych wartości maksymalnych fal tych sygnałów łatwo odnieść do równie łatwo mierzalnych czasów wystąpienia załamków R. Wówczas rzeczywiście można stwierdzić, że na podstawie równoczesnego pomiaru i analizy sygnałów EKG, SKG i ŻKG można wyznaczyć czas otwarcia zastawki aortalnej. Niemniej w rozprawie nie znalazłem jasno przedstawionego stosownego toku dowodzenia dla drugiej części tezy.

3. Dane pomiarowe

Warto docenić podjętą przez doktoranta próbę wykonania i zastosowania urządzenia pomiarowego w celu wykonania własnych pomiarów sygnałów EKG, SKG i ŻKG. Szkoda, że z 16 pomiarów (osób) autor mógł wykorzystać jedynie 6. Może to świadczyć o niewystarczającej staranności w zaprojektowaniu lub przeprowadzeniu eksperymentów przez doktoranta lub o niewłaściwie zaprojektowanym lub wykonanym urządzeniu. Doktorant słusznie zauważył w podsumowaniu pracy, że warto rozbudować bazę pomiarów i zapewne zdobył w wyniku prowadzonych prac stosowne doświadczenie do tego, aby w dalszych pracach badawczych wykonywać pomiary w bardziej efektywny sposób. Warto również, aby w przyszłości doktorant najpierw zweryfikował czy zaprojektowane urządzenie prawidłowo rejestruje sygnały (np. względem urządzenia referencyjnego, itp.) zanim wykorzysta je we własnych pomiarach.

Szkoda również, że analizując dane pomiarowe mgr inż. Szymon Sieciński nie przeprowadził (lub nie opisał) wpływu doboru parametrów poszczególnych algorytmów na uzyskiwane wyniki. Przykładowo operacje filtracji oraz uśredniania wartości (wygładzania) mogą mieć istotny wpływ na wyznaczenie maksimum sygnału. Nie znalazłem również informacji o weryfikacji prawidłowości wykrywania wartości maksymalnych przez algorytm zastosowany do sygnałów SKG i ŻKG. Mój niepokój budzą oznaczenia zaprezentowane na przykładowych rysunkach 4.2 czy 4.5, na których czarnym kółkiem zaznaczono (wykryte?) wartości maksymalne fal AO i gj. Na rysunku 4.2 pierwszy z dwóch punktów zaznaczonych kółkiem dla fal AO nie pokrywa się z wartością maksymalną, a odstęp AO-AO jest

wyznaczony między punktami oznaczonymi tymi kółkami (czyli niewłaściwe maksimum pierwszej fali AO do właściwe maksimum kolejnej fali AO). Na rysunku 4.5 drugi z dwóch punktów zaznaczonych kółkiem dla fal gj nie pokrywa się z wartością maksymalną, a odstęp gj-gj jest wyznaczony między rzeczywistymi wartościami maksymalnymi (a nie tymi, oznaczonymi kółkami).

4. Inne uwagi szczegółowe, edytorskie i pytania do doktoranta

Rozprawa jest ogólnie zredagowana poprawnie i czytelnie, lecz autor nie ustrzegł się pewnych innych drobnych uchybień czy braków merytorycznych oraz niewielkich problemów edytorskich.

Pozostałe uwagi merytoryczne

Doktorant oparł swój dowód pierwszej części tezy na wykonaniu analizy korelacyjnej oraz wykorzystaniu wykresów Blanda-Altmana. Skoro teza postuluje brak istotnych różnic pomiędzy wynikami analiz zmienności rytmu wykonanymi dla sygnałów EKG względem SKG i ŻKG to szkoda, że doktorant nie przeprowadził analizy istotności statystycznej i nie pokazał wyników tej analizy w pracy.

Szkoda, że doktorant, przedstawiając zagadnienia dopasowania funkcji gęstości rozkładów prawdopodobieństwa, nie przedstawił szczegółowo stosowanych kryteriów dopasowania i uzyskanych wartości stanowiących miarę jakości dopasowania.

Warto, aby doktorant jasno oznaczał w ilustracji pomierzonych sygnałów stosowne osie akcelerometru/żyroskopu. Wybór określonej osi jako najlepszej zakłada stosowną relację pomiędzy montażem czujnika w urządzeniu pomiarowym a pozycją osoby badanej. Dlatego wskazanie osi Y jako najlepszej dla oceny sygnału ŻKG powinno być odpowiednio skomentowane w pracy.

Uwagi edytorskie

Czytelność opisów osi na większości wykresów ilustrujących wyniki (korelacja, wykresy Blanda-Altmana) jest bardzo niska. Autor pracy mógł łatwo poprawić rozmiar czcionek, a nawet wielkość rysunków, gdyż marginesy znacznie to umożliwiały.

W pracy występują drobne błędy językowe związane z konstrukcją zdań i ich zrozumieniem. Przykładowo na stronie 59: „Według R. Taylora (...) wartość współczynnika korelacji Pearsona bliska 1 wskazuje na silnie liniową tym bardziej liniowa zależność między dwiema analizowanymi zmiennymi”, lub na stronie 96: „Powodem były zastosowania filtracji medianowej były zakłócenia impulsowe (...)”.

Zastosowany styl edytorski nie jest w niektórych przypadkach zgodny z przyjętym w Polsce stylem. Przykładowo, na końcu numeracji podrozdziałów przyjęło się umieszczać kropkę. Na końcu zdania stanowiącego podpis pod rysunkiem przyjęło się nie stawiać kropki. Niektóre elementy tekstu bądź rysunków wykraczają poza przyjęte granice tekstu w pracy (np. s. 9, s. 29, s.47, s.100)

Pytania do autora rozprawy:

1. Czy doktorant zbadał jaki wpływ na istotę uzyskanych wniosków w zakresie tezy miały wyniki samodzielnie wykonanych pomiarów?

2. Czy doktorant zbadał czy częstość akcji serca wpływała na uzyskiwane wyniki wyznaczanych różnic R-R vs. AO-AO i R-R vs. gj-gj?

3. Czy doktorant przeprowadził badania w zakresie wpływu doboru zastosowanych parametrów (np., rozmiar okna uśredniania sygnału, itp.) algorytmów detekcji punktów charakterystycznych sygnałów EKG, SKG i ŻKG na dokładność wyznaczania deskryptorów częstości akcji serca?

4. Czy doktorant stosował bardziej obiektywne testy (np. Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk) w celu zbadania czy rozkład wartości różnic analizowanych odstępów ma charakter rozkładu normalnego?

5. Konkluzja recenzji

Podsumowując stwierdzam, że przedstawione w rozprawie cele badawcze zostały w większości osiągnięte, metody badawcze w większości należyście dobrane i właściwie zastosowane a teza została zasadniczo potwierdzona. Przeprowadzona przez autora analiza porównawcza deskryptorów sygnałów EKG, SKG i ŻKG jest bardzo wartościowa, a wyniki potwierdzają możliwość zastosowania SKG czy ŻKG jako wiarygodnych metod w ocenie zmienności rytmu serca.

Mgr inż. Szymon Sieciński wykazał się odpowiednią wiedzą z zakresu znajomości aktualnej problematyki badań zmienności akcji serca z wykorzystaniem elektrokardiografii, sejsmokardiografii i żyrokardiografii. Zademonstrował także znajomość i umiejętność stosowania właściwych metod badawczych zarówno w przygotowaniu i wstępnym przetwarzaniu danych pomiarowych jak i w analizie porównawczej tych danych. Szereg wyników prac opublikował w materiałach znanych konferencji naukowych, będąc pierwszym autorem 10 publikacji.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Szymona Siecińskiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w świetle obowiązującej Ustawy i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.



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