



ZAKŁAD FIZYKI BIOMEDYCZNEJ
INSTYTUT FIZYKI DOŚWIADCZALNEJ
WYDZIAŁ FIZYKI
UNIwersytet Warszawski

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa, telefon: +48 22 5532870

dr hab. Jarosław Żygierewicz, prof. ucz.
Zakład Fizyki Biomedycznej
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki UW

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 19.05.2023
nr 23

Warszawa 9.05.2023

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Michała Pielu zatytułowana: "Analysis of the brain activity spatio-temporal patterns for development of brain-computer interfaces." Recenzję opracowano na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej.

1. Uwagi ogólne i wprowadzające

Oceniana rozprawa ma klasyczny układ. Składa się z części głównej – sześciu rozdziałów – oraz trzech dodatków opisujących szczegóły matematyczne metod: wygładzanie oparte o dyskretną transformatę cosinusową, analiza składowych niezależnych i dekompozycja na mody empiryczne, opisywanych za literaturą. Autor zamieścił w pracy 49 wykresów i ilustracji pomagających w zrozumieniu opisywanych idei lub dokumentujących uzyskane wyniki. Przedstawiony przegląd literatury obejmujący 110 pozycji jasno wskazuje na orientację autora w zagadnieniach komunikacji mózg-komputer i cyfrowej analizy sygnałów EEG ze szczególnym uwzględnieniem technik usuwania artefaktów. Ogólnie rozprawę czyta się dobrze i treści przedstawione są w logicznej kolejności.

2. Opis i ocena pracy

Rozdział 1 stanowi wstęp do tematyki, której dotyczy rozprawa. Krótko opisana jest koncepcja interfejsów mózg-komputer (BCI). Autor skupia się na interfejsach wykorzystujących potencjały wywołane, w szczególności P300. W tym miejscu, we wstępie, brakuje mi wspomnienia o innych typach interfejsów wykorzystujących inne zjawiska, jak np. potencjały wywołane stanu ustalonego, interfejsy oparte o wyobrażenia mentalne (np. wyobrażenia ruchowe, dotykowe itp.), interfejsy wykorzystujące inne modalności pomiarów aktywności mózgu, np. fNIRS. Autor opisuje swoją motywację do podjęcia tematu a także wyzwania, które

stoją przed konstruktorami interfejsów BCI – w szczególności niski stosunek sygnału do szumu. Krótko przedstawia czynniki ograniczające dokładność i skuteczność rozwiązań opisywanych w literaturze co prowadzi do sformułowania **celu badań** przedstawionych w rozprawie jako:

opracowanie metod filtrowania przestrzenno-czasowego i sposobów klasyfikacji uzyskanych cech (Autor nazywa je "interpretation rules") prowadzących do znacznego wzrostu dokładności klasyfikacji. W mojej ocenie jest to dobrze sformułowany i uzasadniony cel, gdyż faktycznie w kontekście BCI, gdzie danych treningowych jest zwykle mało bardzo istotne jest efektywne i prawidłowe przetworzenie sygnałów EEG, aby cechy wydobyte z zapisu były jak najbardziej dyskryminujące alternatywne wybory.

Autor rozprawy oparł swoje badania na dwóch publicznie dostępnych zbiorach danych z eksperymentów BCI. **Rozdział drugi** zawiera opis baz danych i eksperymentów, z których te dane pochodzą. Dla mnie osobiście nieco mylące było wykorzystanie informacji o eksperymencie "smart home" dla przedstawienia koncepcji eksperymentów BCI, gdyż potem te dane i ten eksperyment nie były wykorzystane do ewaluacji własnych metod Kandydata.

Rozdział trzeci jest w głównej mierze poświęcony na opis rozwoju koncepcji filtrów przestrzenno-czasowych jako narzędzia do poprawiania stosunku sygnału do szumu. Autor zaczyna od prezentacji idei filtra dopasowanego i jego uogólnienia na przypadek szumu kolorowego, demonstrując, że zagadnienie można sprowadzić do maksymalizacji odpowiednio skonstruowanego ilorazu Rayleigha. Zastosowanie takiego filtra prowadzi do wzmocnienia wzorca wykorzystanego w liczniku względem tego wykorzystanego w mianowniku. Te elementy są w zasadzie prezentacją wiedzy literaturowej. Następnie wprowadzając pojęcie "extended vector" pokazuje, że można rozszerzyć koncepcję filtrów dopasowanych do danych wielokanałowych.

Kolejne dwie wersje opisanych filtrów nazwane w pracy "**generalized spatio-temporal matched filter**" (GSTMF) i "**modified spatio-temporal matched filter**" (MSTMF) i wydają się już być autorską propozycją Kandydata. Polegają one na tym, aby zmniejszyć podatność uzyskiwanych filtrów na szum w pierwszej wersji zawarty we fragmentach sygnału zawierających odpowiedź mózgu na bodziec będący celem (zamiast sygnałów w ilorazie Rayleigha pojawiają się odpowiednie średnie), a w drugim przypadku filtry są konstruowane tak aby wzmacniana była różnica pomiędzy średnią dla bodźców będących celem i dla bodźców ignorowanych.

Drugim zagadnieniem poruszonym w Rozdziale 3 jest przedstawienie zasad klasyfikacji cech wydobytych z sygnałów za pomocą filtrów przestrzenno-czasowych, gdzie słusznie skrytykowana jest koncepcja wybrania jednego, z góry ustalonego, punktu czasowego jako podstawy do klasyfikacji ze względu na możliwy rozrzut czasowy odpowiedzi w pojedynczych realizacjach. Jako podejścia alternatywne Autor zaproponował poszukiwanie maksymalnych wartości w pewnym sąsiedztwie oczekiwanego momentu maksymalnej odpowiedzi oraz wykorzystanie owych punktów z otoczenia jako wejścia dla klasyfikatora SVM. Cały rozdział jest spójny i czyta się go dobrze, ale zabrakło mi wyraźniejszego zaakcentowania, które z opisywanych rozwiązań są autorskimi pomysłami Kandydata.

Rozdział czwarty poświęcony jest zagadnieniu usuwania artefaktów z sygnału EEG. Autor zwraca uwagę na cztery klasy artefaktów szczególnie istotnych do usunięcia w kontekście

BCI, są to artefakty mięśniowe, pochodzące od bicia serca, okulograficzne i techniczne związane ze słabym kontaktem elektrod ze skórą. Te dwa ostatnie charakteryzują się zazwyczaj wysoką amplitudą i występowaniem w postaci izolowanych czasowo zdarzeń. Następnie Autor bardzo zwięźle opisuje techniki ślepej separacji źródeł oraz technik odsumiania EEG – temat ten jest obszernie dyskutowany w literaturze więc trudno, aby opis ten był wyczerpujący. Kandydat skupia się na dwóch podejściach, które potem będzie stosował w swoich badaniach – jest to technika usuwania komponentów niezależnych (ICA) najbardziej zanieczyszczonych przez artefakty i usuwanie artefaktu w połączeniu z wypełnianiem powstałej "luki" za pomocą interpolacji, tu autor zaproponował wygładzanie za pomocą dyskretnej transformaty cosinusowej (DCTBS). Zastosowanie techniki DCTBS wymaga zidentyfikowania artefaktu i zastąpienie próbek w sygnale wartościami otrzymanymi z interpolacji wykorzystującej informacje z sąsiednich kanałów i próbek czasu. Technika wydaje się mieć zastosowanie w przypadkach, gdy artefakt występuje w stosunkowo niedużej liczbie kanałów. Przykład przedstawiony na Rys. 4.4 oprócz ilustrowania interpolacji DCTBS ukazuje jeszcze jeden problem, nieopisany w pracy. Mianowicie zastosowane filtry mają złożoną odpowiedź impulsową, zaznaczony pik w okolicy próbki 300 wywołuje odpowiedź impulsową widoczną dalej w okolicach próbki 400. O ile interpolacja DCTBS daje rozsądny przebieg w interpolowanym zakresie próbek to efekt późniejszej odpowiedzi impulsowej pozostaje. Drobna uwaga edytorska – w rozdziale 4 przydałby się odnośnik do Appendix A, w którym opisana jest matematyczna koncepcja DCTBS.

Kolejne propozycje Kandydata polegają na wykorzystaniu techniki ICA (algorytm JADE). Jak słusznie zauważa Autor komponenty otrzymane w wyniku ICA zwykle nie są czystym artefaktem lub czystym sygnałem EEG – zwykle w komponencie zdominowanym przez artefakt pozostaje także nieco sygnału EEG i na odwrót. Zatem dla oszczędzania danych EEG Autor zaproponował trzy podejścia (i) aby w komponencie zdominowanym przez artefakt zerować tylko fragment odpowiadający artefaktowi, (ii) do komponentu artefaktowego zastosować dekompozycję EMD (empirical mode decomposition) a następnie zidentyfikować i wyzerować składowe o wysokiej kurtozie, (iii) korektę wykorzystującą składowe EMD aplikować tylko we fragmencie istotnie zaburzonym przez artefakt. Generalnie te trzy podejścia wydają się rozsądne w kontekście BCI, a ich efektywność została czytelnie zilustrowana. Podejścia (i) oraz (ii) zostały wykorzystane dla danych o małej liczbie kanałów, zaś wszystkie trzy w przypadku bazy danych z dużą liczbą kanałów.

Z opisu algorytmu na stronie 37 nie jest dla mnie jasne jak stosowany jest algorytm ICA: czy macierz mieszająca jest (i) estymowana osobno dla każdego fragmentu sygnału podejrzanego o artefakt, (ii) czy jest estymowana raz na podstawie danych kalibracyjnych a potem tylko wykorzystywana do rzutowania wszystkich danych. *Chciałbym, aby Doktorant wyjaśnił to w czasie obrony.*

Zaprezentowane wyniki wskazują, że metoda dekompozycji tylko pewnego podzbioru oryginalnych kanałów techniką ICA a następnie uzyskanie rzutów komponentów o wysokiej kurtozie na oryginalne kanały i odjęcia tych rzutów daje dobre rezultaty. *Czy zaproponowana technika dla dużej liczby kanałów ma przewagę nad standardowym podejściem, gdzie najpierw redukuje się liczbę kanałów za pomocą PCA a następnie ICA stosuje się do komponentów PCA o wysokiej wariancji?*

Uwaga, na str. 29 Kandydat napisał, że wagi z jakimi źródła w mózgu wpływają na sygnały rejestrowane na elektrodach zależą od odległości ("... weights dependant on the distance between its source and the electrode on the skull") – to tylko częściowo prawdziwe stwierdzenie, bo czynników wpływających na udział danego źródła w sygnale danej elektrody jest więcej, np. przewodnictwo tkanek pomiędzy źródłem a elektrodą i geometria źródła.

Rozdział piąty zawiera obszernie przedstawienie wyników eksperymentów numerycznych ilustrujących działanie i skuteczność poszczególnych elementów zaproponowanych rozwiązań. Opis wyników został podzielony na dwie zasadnicze części odpowiadające eksperymentom z dwoma różnymi bazami danych. Dla pierwszej z nich, "Item selection", Autor testuje metody przygotowane dla eksperymentów z małą liczbą kanałów. Ilustruje efekt usuwania artefaktu za pomocą DCT i ICA i opisuje procedurę doboru parametrów dla konstrukcji filtrów – kluczowe parametry dobrane zostały w procedurze walidacji krzyżowej. Przetestowane zostały kombinacje trzech wersji filtrów przestrzenno-czasowych, trzech reguł klasyfikacyjnych (oparta o jeden punkt, poszukiwanie maksimum w przedziale i SVM) Został wykazany zysk z aplikowania kolejnych modyfikacji proponowanych przez autora (Tabela I). Dodatkowo dla najlepszej kombinacji zostały przetestowane efekty trzech sposobów usuwania artefaktów w dwóch wariantach: gdy artefakty były usuwane tylko w zbiorze uczącym lub zarówno uczącym jak i testowym (Tabela II). Wyniki raportowane są w postaci średnia dokładność $\pm$ SEM. O ile Tabela I faktycznie uwidacznia realne przyrosty dokładności, z najlepszymi osiągnięciami dla algorytmu MSTF+MDR i MSTF+SVM, to wyniki zaprezentowane w Tabeli II są w granicach błędu jednakowe zatem wg. mnie stwierdzenie Autora, że ten zestaw wyników wskazuje ("indicates"), że któraś kombinacja jest lepsza jest może trochę za mocne.

W sekcji 5.1.5 przedstawione są wyniki optymalizacji parametru τ w oparciu o wyniki eksperymentów numerycznych. *Czy wyniki te można zinterpretować w kontekście tw. Nyquista i charakterystyk filtrów wykorzystanych w preprocessingu danych?*

Przeprowadzone oszacowanie czasów obliczeń dla wybranych kombinacji filtrów przestrzenno-czasowych wskazuje, że metody wykorzystujące DCT są obliczeniowo zbyt złożone do wykorzystania w praktyce. Kandydat pokazuje, że uzyskane wyniki przewyższają większość wyników osiągniętych na tym samym zbiorze danych przez uczestników 2019 IFBME Scientific Challenge. Jedynie rozwiązanie bazujące na sEEGNet daje porównywalnie dobre wyniki.

Druga część rozdziału piątego poświęcona jest opisowi wyników eksperymentów numerycznych z bazą "speler" o znacznie większej liczbie kanałów. Autor demonstrowa efektywność trzech podejść do usuwania artefaktów. Parametry algorytmów ustalone dla pierwszej bazy danych zostały dopasowane i przetestowane dla drugiej bazy danych. Zaprezentowane testy efektywności dotyczą wersji algorytmów dla filtru przestrzenno-czasowego MSTF i trzech reguł klasyfikacji (MSTF+CDR i MSTF+MDR, MSTF+SVM) w połączeniu z różnymi wersjami technik usuwania artefaktów. Zastanawiające jest, dlaczego otrzymana w wyniku optymalizacji wartość parametru $\delta = [20, 30]$ ms nie była potem wykorzystana do uzyskania końcowych wyników przedstawionych w Tabeli V – czy to błąd edytorski czy faktyczna różnica? Tabela V ma jeszcze jeden mankament – nie zostały w niej

wpisane wartości SEM, co uniemożliwia ocenę różnic w dokładności różnych wersji algorytmu. Analogiczny problem występuje w Tabeli VI, która zestawia wyniki Kandydata z wynikami literaturowymi. Średnie wyniki najlepszych algorytmów doktoranta są sufitowe – na poziomie 99% dokładności i są wyższe niż średnie wyniki większości pozostałych metod, ale brak SEM lub wyników testów statystycznych uniemożliwia stwierdzenie czy są to różnice istotne.

Główną część rozprawy kończy rozdział 6 zawierający podsumowanie i rekapitulację głównych osiągnięć, wskazując które z zaproponowanych modyfikacji wyjściowego algorytmu przyczyniły się do zasadniczych wzrostów dokładności. Techniki zaproponowane przez Doktoranta mogą być wykorzystane w praktycznych realizacjach interfejsów BCI.

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Michała Pieli, nie wymaga uzupełnień ani poprawek i spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.