

Warszawa, 28.08.2022

dr hab. Maciej Kamiński, prof. ucz.  
Zakład Fizyki Biomedycznej, Wydział Fizyki UW  
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa  
[Maciek.Kaminski@fuw.edu.pl](mailto:Maciek.Kaminski@fuw.edu.pl)

### **Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Michała Konrada Komorowskiego**

Praca mgra Michała Konrada Komorowskiego pt. „Locally specific human brain dynamics automatically modeled using spectral features of MEG/EEG signals” przedstawia zagadnienie zaprojektowania i wykonania pakietu obliczeniowego implementującego metodę spectral fingerprinting, mającą służyć do analizy, rozpoznawania i badania stanów pracy mózgu na podstawie charakterystyki sygnałów EEG i MEG.

Obecnie, dzięki rozwojowi technologii obliczeniowych możemy pokusić się o wdrożenie metod obliczeniowych mających duże wymagania sprzętowe oraz wysoki stopień złożoności przeprowadzanych obliczeń. Propozycje analiz uwzględniających aspekty rzeczywistej budowy i działania mózgu mają coraz większe szanse na udane implementacje, chociaż w momencie przedstawienia ich koncepcji teoretycznych może to jeszcze nie być łatwe. Z drugiej strony, eksperci z dziedzin neurobiologii czy medycyny z reguły nie są jednocześnie ekspertami informatycznymi i muszą polegać na oprogramowaniu tworzonym przez innych specjalistów. I tutaj właśnie za istotną wartość uważam sytuację, gdy ekspert informatyczny jednocześnie jest zorientowany w tematyce neurobiologicznej, tak jak jest to w przypadku omawianej pracy. Dzięki takiemu związkowi, twórca oprogramowania orientuje się w szczegółach opracowywanego zagadnienia i jest znacznie mniejsza szansa na popełnienie podczas pracy istotnych błędów natury merytorycznej.

W pracy podjęto się zadania stworzenia pakietu do analizy danych metodą zaproponowaną w publikacji [1]. Idea oparta jest na założeniu, że poszczególne obszary mózgu przetwarzają informację i są aktywne w pewnych charakterystycznych dla siebie zakresach częstości. Ponieważ informacja w komórkach nerwowych jest przetwarzana za pomocą impulsów elektrycznych, aktywność mózgu możemy badać za pomocą pomiarów potencjału elektrycznego (EEG) lub pola magnetycznego (MEG) wytwarzanych podczas pracy mózgu.



W pracy [1] naszkicowana została koncepcja metody opartej na analizie tzw. odcisków palca — profili mocy w przestrzeni częstotliwości, charakterystycznych dla poszczególnych obszarów mózgu — oraz przedstawiona część kodu programu, który do wyznaczania tych odcisków palca miałby służyć. Aby jednak każdy badacz mógł z tej metody skorzystać, od przeczytania artykułu droga jest daleka: wcześniej (i później) jest wiele niezbędnych do wykonania etapów przygotowawczych, pracochłonnych i czasochłonnych. Autor rozprawy podjął się zadania stworzenia kompletnego narzędzia badawczego umożliwiającego analizę zebranych danych omawianą metodą „odcisków palca”, narzędzia ułatwiającego przebieg poszczególnych etapów przygotowania danych, obliczeń, analizy i wizualizacji wyników, i — co jest bardzo ważne — dostępnego dla każdego jako projekt open-source wraz z kodem źródłowym w Internecie.

W zakresie oceny formalnej kompozycja przedstawionej rozprawy jest prawidłowa. Tytuł odpowiada treści pracy. Liczy ona 177 stron, zawiera także 32 strony dodatków szczegółowych, 82 figury, 5 tabel i 10 listingów kodu programów. Lista bibliograficzna liczy 262 pozycje. Praca posiada spis treści, indeks skrótów oraz spis ilustracji i tabel. Praca jest zasadniczo napisana językiem jasnym i zrozumiałym. Wzory są czytelne, tabele i podpisy rysunków również. Źródła rysunków zaczerpniętych z innych publikacji są cytowane. Jedynym drobnym mankamentem formalnym, nie zmniejszającym wartości merytorycznej pracy, jest niespójność w zapisie jednostek prezentowanych wielkości fizycznych, które powinny być konsekwentnie pisane fontem prostym.

Struktura pracy jest następująca: po ogólnym Wprowadzeniu opisującym cel i ogólną strukturę pracy kolejny rozdział opisuje pojęcia omawiane w dalszych rozdziałach oraz podstawy funkcjonowania komórek nerwowych, generacji sygnałów eklektycznych i magnetycznych, na których badaniu opiera się metoda. Opisane zostały tu również własności widmowe sygnałów EEG i MEG oraz podstawy rejestracji sygnałów MEG oraz MRI. Rozdział 2 opisuje koncepcję obliczania oscillation fingerprinting i analizowania sieci aktywacji mózgu w różnych stanach jego funkcjonowania. Omówiono budowę takich sieci na podstawie analizy macierzy połączeń i teorii grafów (GTA). Rozdział 3 przedstawia zasadniczą metodę, którą implementuje omawiana praca: spectral fingerprinting. Tutaj pojawia się algorytm opisany w pracy [1], który został przez autora rozprawy uzupełniony o elementy brakujące w oryginalnej publikacji, dzięki czemu metoda staje się możliwa do zastosowania w różnych sytuacjach, nie tylko dla przedstawionej w pracy



[1]. Autor wprowadził również do oryginalnego kodu własne ulepszenia oraz przetestował swój kod odtwarzając oryginalne wyniki z innych publikacji, przy okazji wskazując na pewne rozbieżności, które będą wymagać jeszcze prac wyjaśniających.

Rozdział 4 jest najważniejszy w pracy i przedstawia szczegóły implementacji pakietu do obliczeń metodą odcisków palca, pakietu nazwanego przez autora ToFFi (Toolbox for Frequency-based Fingerprinting). Opisano wymagania pakietu, jego strukturę, podział zadań na poszczególne etapy, podstawowe zmienne użyte w kodzie. Przedstawiono wartości tych zmiennych podczas obliczania przykładowych wyników. Autor zadbał również o procedury do prezentacji na rozmaite sposoby otrzymanych wyników, uwzględniające możliwość pracy wsadowej, nie zapomniał także o procedurach porządkujących katalogi z danymi i wynikami. Aby uzyskać powtarzalność wyników przewidziano możliwość wpływu na generatory liczb pseudolosowych wykorzystywanych podczas obliczeń tak, aby użytkownik mógł dokładnie odtworzyć konkretne wyniki.

Bardziej obszerny przykład możliwości prezentowanej metody jest przedstawiony w rozdziale 5. Tutaj możemy zapoznać się z praktycznymi aspektami rozwiązań zaproponowanych przez autora. Na koniec autor dyskutuje ograniczenia metody i dokonuje krótkiego podsumowania. Po tych rozdziałach do pracy dołączone są załączniki opisujące dokładnie szczegóły implementacji i zastosowanych algorytmów.

Niewątpliwie nowatorską wartością pracy jest implementacja przez autora wszystkich niezbędnych etapów przeprowadzenia procedury przygotowania danych, zaprojektowanie procesu obliczeniowego i prezentacji wyników oraz przeprowadzona analiza złożoności algorytmów. Ponieważ procedura jest czasochłonna, i w przypadku bardziej złożonych problemów może obejmować wielogodzinne obliczenia, autor zadbał o umożliwienie użytkownikowi uruchamiania jej w sposób równoległy na wielu jednostkach obliczeniowych, jeśli jest taka możliwość do dyspozycji. Dokonał również analizy złożoności obliczeniowych poszczególnych etapów algorytmu, najpierw teoretycznie, a następnie zbadał przewidywania na konkretnych przypadkach.

Podczas czytania pracy nasunęło się mi kilka pytań, widzianych z pozycji ewentualnego przyszłego użytkownika, do których mogę się zaliczać. Wymienię je poniżej.

- Czy autor widzi jakąkolwiek możliwość przetestowania zaimplementowanej w pracy procedury na sztucznie symulowanych (na przykład ze znanego rozkładu źródeł i rozwiązaniu problemu wprost) danych, gdzie wiadomo jakich wyników oczekiwać?
- Podczas próby porównania własnych rezultatów i wyników z innej publikacji (str. 68) nie uzyskano zgodności dla sygnałów EEG. Jako możliwą interpretację podano przypuszczenie, że problemem może być faktyczny zakres widma sygnału EEG zbieranego z czaszki. Czy może zatem można by dla EEG skrócić zakres częstości branych pod uwagę do analizy, aby nie wchodzić w obszar praktycznie nieobecny w zapisach EEG?
- Na rys. 3.2 zauważamy, że istotną częścią analizy przedstawioną metodą jest posiadanie danych z jednoczesną rejestracją MRI-MEG. Jest to również wyraźnie powiedziane na str. 87 (“data preparation should always cover ... MRI-MEG co-registration”). Czy jest jakaś furtka dla tych, którzy chcieliby skorzystać z analizy „odcisków palca”, a nie posiadają takich danych w swoim eksperymencie?
- Ponieważ wyniki są tak naprawdę liczone z danych pochodzących z sensorów (EEG lub MEG) na powierzchni głowy, cała informacja później wykorzystywana jest już tam zawarta. Czy można by się pokusić o zdefiniowanie i analizę odcisków palca trochę innego rodzaju: liczonych od razu dla typowych rozkładów elektrod EEG czy sensorów MEG, bez estymacji źródeł w poszczególnych strukturach?
- Fig. 4.6 – wartości wypisane przy wyszczególnionych na rysunku maksimach nie zgadzają się ze skalą pionową (różnica o 1).
- Na str. 175 znajdujemy stwierdzenie, że “we have not yet established a clear link between frequencies and networks”. Pojawia się więc pytanie: na ile możemy założyć, że taki związek ma miejsce?
- Przedstawiony w pracy pakiet jest niewątpliwie osiągnięciem z zakresu informatyki. Z punktu widzenia użytkownika z zakresu neurobiologii czy medycyny może być jednak dość „surowy” w użyciu, jako wymagający pracy z linii komend. Czy przewidziane (możliwe) jest stworzenie graficznego interfejsu użytkownika (GUI)?

Problemy wyszczególnione powyżej mają jednak raczej charakter zachęty do dalszych prac ulepszeniowych, nie są krytyką przedstawionych rezultatów. Wysoko oceniam dbałość autora o wszystkie szczegóły prezentowanej procedury. Przedstawiony pakiet jest obejmuje pełny zestaw niezbędnych kroków, co uznaję za duże osiągnięcie autora. Ponadto autor wykazał się umiejętnościami na wszystkich etapach powstawania pracy. Biorąc powyższe pod uwagę sądzę, że praca jest oryginalnym osiągnięciem autora, zawierającym kompletne i samodzielne rozwiązanie postawionego problemu — implementacji pakietu obliczeniowego wraz z analizą zaproponowanego kodu i bez wątpienia spełnia warunki jakim musi zgodnie z ustawą podlegać rozprawa doktorska. Wnioskuje więc do wysokiej Rady Naukowej IPPT PAN o jej przyjęcie i dopuszczenie mgra Komorowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z poważaniem



Maciej Kamiński

[1] Keitel and J. Gross, "Individual human brain areas can be identified from their characteristic spectral activation fingerprints," PLoS Biol, vol. 14, no. 6, p. e1002498, 2016. doi: 10.1371/journal.pbio.1002498.