

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest poprawiona rozprawa doktorska pana magistra Mariana Dovgialo zatytułowana: *"Interfejsy mózg-komputer i zaburzenia świadomości"*. Recenzja jest sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego, pana prof. dr. hab. Wojciecha Satuły przedstawione pismem BRN-XII/531/46//2022 z dnia 23.06.2022. Recenzowana rozprawa została napisana w 2022 roku pod kierownictwem pana prof. dr hab. Piotra Durki, a promotorem pomocniczym jest pani dr Anna Duszyk-Bogorodzka. Rozprawa została skierowana do poprawy na wniosek recenzenta, p. prof. dr. hab. inż. Andrzeja Materki (recenzja z dnia 20.08.2022). Spełniając postulat recenzenta doktorant przedstawił nową rozprawę oraz list, w którym ustosunkowuje się do uwag recenzentów. Rozprawę opiniuję niezależnie od jej poprzedniej wersji.

1. Zawartość rozprawy

Przedstawiona rozprawa składa się ze Wstępu, pięciu rozdziałów numerowanych 2 - 6 i Podsumowania. We Wstępie autor przedstawia zakres prowadzonych badań związanych z interfejsami mózg-komputer, główny cel podejmowanych prac oraz przegląd jej zawartości. Nie znajdziemy tu wyodrębnionej tezy, jest natomiast spis zagadnień, które autor uważa za najważniejszą wartość dysertacji oraz najważniejsze osiągnięcia prowadzonych badań. Oba osiągnięcia wymienione przez Autora mają charakter implementacyjny.

W Rozdziale 2 przedstawiono ogólne zasady działania interfejsów mózg-komputer i przegląd paradygmatów jakich używają, propozycję uniwersalnego szkieletu aplikacji interfejsu mózg-komputer i procedur w nim zawartych specyficznych dla interfejsów opartych na potencjale P-300 i opartych na stacjonarnych wzrokowych potencjałach wywołanych SSVEP.

Rozdział 3 przedstawia stan badań dotyczących interfejsów BCI oraz motywację i szerszy kontekst podjętych prac. Autor opisuje tu wybrane doniesienia używające modalności P300 z bodźcami wzrokowym, słuchowym i czuciowym oraz SSVEP, natomiast paradygmat ERD/ERS zostaje pominięty, jako mniej efektywny.

Rozdział 4 zawiera opis implementacji interfejsu mózg-komputer z wykorzystaniem modułów funkcjonalnych. W szczególności przedstawione są zagadnienia związane z analizą zapisów elektroencefalograficznych, wyznaczaniem metaparametrów, generowaniem bodźców wzrokowych, słuchowych i czuciowych związanych z interfejsem działającym w paradygmacie P-300 oraz bodźców wzrokowych niezbędnych dla interfejsu opartego na stacjonarnych wzrokowych potencjałach wywołanych. Opisano także przebieg przykładowych sesji komunikacji użytkownika z komputerem w paradygmatach P300 i SSVEP.

Rozdział 5 zawiera opis badań przeprowadzonych na grupie 30 zdrowych ochotników z użyciem czterech modalności BCI w celu podważenia hipotezy analfabetyzmu BCI. Wprowadzie dyskusyjne jest czy występowanie tego zjawiska u 20% populacji (i to tylko wg

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mariana Dovgialo

jednego źródła) można nazwać „powszechnym”, jednakże w wyniku eksperymentu Autor potwierdza skuteczną komunikację z każdym z wolontariuszy w co najmniej jednym paradygmacie. Cennym wnioskiem tych badań jest stwierdzenie zróżnicowanej skuteczności poszczególnych paradygmatów u poszczególnych osób, ale sformułowanie i wyjaśnienie kryterium optymalizacji paradygmatu wymaga dalszych badań. Warto zauważyć, że możliwość przeprowadzenia badań wielomodalnych została osiągnięta przez zaprojektowanie obsługującego systemu w sposób wysoce uniwersalny.

W Rozdziale 6 przedstawiono możliwość wykorzystania interfejsów mózg-komputer do analizy zaburzeń świadomości. Opisano klinicznie stosowaną metodę behawioralnej oceny poziomu świadomości oraz możliwość użycia interfejsu mózg-komputer jako obiektywnego narzędzia diagnostycznego. Zaproponowano protokół kalibracji interfejsu i badania pacjentów, zestaw eksperymentalny a następnie metodę eliminacji artefaktów i klasyfikacji otrzymanych zapisów. Opis metodyki analizy danych diagnostycznych uzupełnia symulacja Monte Carlo pacjenta nieresponsywnego. Przedstawiono wyniki eksperymentalne uzyskane w badaniu 10 osób dorosłych oraz 15 pacjentów warszawskiej kliniki Budzik. Otrzymane wyniki zostały skomentowane jako obiecujące ale trudne w automatycznej interpretacji autor słusznie wskazuje problemy z osiągnięciem istotności diagnostycznej otrzymanych rezultatów i wskazuje zbieżność zaproponowanej diagnostyki obiektywnej ze standardowo stosowaną oceną behawioralną.

W Podsumowaniu przywołano numery projektów badawczych w ramach których realizowane były opisywane badania a także wypunktowano elementy stanowiące wkład autora dysertacji do rezultatów projektu. Rozprawę uzupełnia spis bibliograficzny zawierający 44 pozycje, w tym 3 prace których autorem, w tym raz pierwszym (IF czasopisma = 6,325!), jest autor dysertacji. Istotnym elementem rozprawy są także odnośniki do repozytoriów w których można znaleźć fragmenty oprogramowania utworzonego w ramach opisanych badań.

2. Znaczenie dokonań Autora dla rozwoju dyscypliny

Unifikacja dwóch paradygmatów interfejsów mózg-komputer w jednym, uniwersalnym systemie oraz propozycja zastosowania tych interfejsów do obiektywnej diagnostyki osób z zaburzeniami świadomości są ogromnymi zaletami rozprawy i pomimo na razie niejednoznacznych wyników stanowią największe dokonania autora. Najważniejszymi szczegółowymi jego osiągnięciami są:

- zaprojektowanie i implementacja i przetestowanie uniwersalnego oprogramowania i przykładowe jego wykorzystanie do eksperymentów związanych z detekcją zaburzeń świadomości, oraz do podważenia hipotezy analfabetyzmu BCI,
- zaprojektowanie i implementacja procedury diagnostycznej, dzięki której możliwa jest ocena statystycznej istotności odpowiedzi BCI pacjentów w stanie zaburzeń świadomości z uwzględnieniem przyjętych w praktyce klinicznej zasad oceny behawioralnej,
- zaproponowanie i przebadanie metody wykrywania świadomych działań u badanych nawet w przypadkach gdy skale behawioralne wskazują na brak świadomości.

Podczas realizacji badań autor przeprowadził analizę aspektów technicznych, matematycznych, statystycznych i psychofizycznych, które składają się na poprawnie działający system BCI, zweryfikował zaproponowane oprogramowanie na zdrowych ochotnikach oraz opisał, a większości także rozwiązał specyficzne problemy spotykane podczas prób diagnozy pacjentów w stanach zaburzeń świadomości. Rozprawa ma charakter implementacyjny, a przeprowadzone badania, po dalszej walidacji klinicznej, mogą przynieść konkretne zastosowania praktyczne.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mariana Dovgialo

Rozprawa prezentuje szeroką wiedzę jej autora dotyczącą zagadnień związanych z interfejsami BCI oraz z diagnostyką zaburzeń świadomości. Trzy problemy wymienione powyżej jako najważniejsze osiągnięcia są zagadnieniami badawczymi, dla których autor znalazł oryginalne, wartościowe rozwiązanie. Jestem głęboko przekonany, że zastosowanie zaproponowanych rozwiązań w obiektywnej diagnostyce stanu świadomości wymaga jedynie niewielkich poprawek algorytmicznych i przeprowadzenia testów liczniejszej populacji. Pozostały wkład autora w realizację wymienionych projektów badawczych, taki jak konstrukcja modułu jednoczesnego pomiaru sygnału i impedancji elektrod, zaprojektowanie modułu panelu kontrolnego BCI oraz prace nad ogólną architekturą i rozwiązaniami komunikacyjnymi aplikacji, ma charakter konstruktorski i choć gra istotną rolę w realizacji projektów nie jest działaniem naukowym.

3. Zagadnienia do dyskusji

Za drobny mankament rozprawy uważam powierzchowny opis interfejsów działających z użyciem paradygmatu synchronizacji do synchronizacji ERD/ERS. Dyskusja przyjętych rozwiązań zawierająca np. rozważania alternatywnych metod przetwarzania sygnałów lub realizacji softwareowych jest skromna, co sprawia, że dzieło bardziej przypomina raportu z wykonanych prac naukowych i konstrukcyjnych niż dysertację naukową o uniwersalnym charakterze. Przykładowo, w Tab. 3.1 zestawiono dane z dwóch artykułów, więc jak na przegląd literatury to skromnie. Poza tym Autor wydaje się konstruować wektory cech tylko na podstawie liniowych przekształceń sygnału, takich jak np. PCA. Tymczasem, do klasyfikacji EEG w różnych zastosowaniach przydają się miary nieliniowe i w zależności od zestawu cech rozmaite klasyfikatory okazują się optymalne. Uniwersalność i powtarzalność wykonanych badań jest uszczuplona przez stosowanie odniesień do bibliotek wybranego języka Python, zamiast opisu matematycznego, a także używanie żargonu programistycznego (np. *‘wspierane wzmacniacze’*, str. 51). Odtworzenia warunków eksperymentu nie ułatwiają też opisy w formie (przykład str. 82): *‘... silników wibracyjnych Precision Microdrives, sterowanych za pomocą specjalnie zbudowanej, galwanicznie izolowanej od komputera płytki, podłączanej przez złącze USB, kontrolowanej przez system BCI’*. Podobnie na str. 98 brak informacji o rzędzie filtra Butterwortha, uniemożliwia powtórzenie jego ustawień. Mylące jest opisywanie czterech modalności BCI w badaniu hipotezy ‘analfabetyzmu BCI’ (Rozdział 5), a następnie zastosowanie czterech innych modalności w opisie badań świadomości (Rozdział 6), o czym czytelnik jest informowany dopiero w podrozdziale 6.6., a powód rezygnacji z SSVEP w badaniach klinicznych wyjaśniono dopiero na str. 115 (ostatnie zdanie).

Chciałbym zaproponować aby podczas obrony Doktorant skomentował następujące wątpliwości, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy:

- Na stronie 38. autor zauważa, że *‘Interfejs zbadano na ochotnikach po udarze z syndromem zamknięcia i cierpiących na stwardnienie rozsiane, osiągając poprawność na poziomie 80% u pacjentów cierpiących na stwardnienie rozsiane i 20% u pacjentów po udarze.’* - Jakiej sytuacji odpowiada 20% ? wartość ta jest niższa niż losowe zgadywanie bodźców.
- Na stronie 48. opis filtracji mówi: *‘... EEG. Sygnał jest filtrowany konfigurowalnym filtrem nieskończonej odpowiedzi impulsowej (ang. infinite impulse response, IIR) zastosowanym jednostronnie, próbka po próbce sygnału’* – Opis filtra jest

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mariana Dovgialo

niejednoznaczny: 1. dlaczego zastosowano filtr IIR? 2. jakie parametry podlegają konfiguracji? 3. co oznacza stwierdzenie, że filtr jest jednostronny?

- Na stronie 50. można przeczytać zdanie dotyczące modułu analizy: *‘Jego zaletą jest automatyczne dopasowywanie się do dowolnej liczby kanałów, częstości próbkowania, liczby możliwych opcji oraz do sygnałów z różnych typów wzmacniaczy.’* – w miejsce tego marketingowego opisu poproszę o wyjaśnienie jak działa automatyczne dopasowanie i czy jest to rozwiązanie autorskie.
- Na stronie 51. autor pisze: *‘Moduł prezentacji bodźców przypisuje momentom wystąpienia bodźców znaczniki czasu z dokładnością do 2 ms ze znacznikami czasu próbek sygnału.’* – poproszę o wyjaśnienie.
- Na stronie 52. można przeczytać: *‘Użytkownik ma za zadanie skupianie uwagi na bodźcu typu cel tylko na jednej z możliwych do wybrania opcji — efektywnie skupia uwagę na jednej procedurze odd-ball, ignorując pozostałe.’* – poproszę o wyjaśnienie jaki zakres czynności użytkownika autor rozumie przez 'procedurę odd-ball'?
- Na stronie 56. autor stwierdza, że *‘sygnał przebróbkowywano do częstości próbkowania 21 razy mniejszej (23,809 Hz) niż częstość rejestracji (500 Hz), w celu minimalizacji długości wektora cech,’* – Czy stosowano filtr antyaliasingowy, jeśli tak, to jaki? z czego wynika przyjęty współczynnik decymacji? Przy okazji: cechą nie jest punkt, tylko amplituda sygnału w punkcie.
- Na stronie 68. autor pisze: *‘Obliczany jest współczynnik fałszywych wyników pozytywnych dla każdego progu detekcji celu.’* – rozumiem, że chodzi o odsetek, a nie współczynnik. Opis podważa wcześniejsze spostrzeżenia, że optymalizacja klasyfikatora polega na maksymalizacji AUC. W tym miejscu autor wprowadza rozwiązania heurystyczne bez jakiegokolwiek uzasadnienia.
- Na stronie 70. autor pisze: *‘że moc oceny jest wystarczająco stabilna’* – proszę o wyjaśnienie: 1. co oznacza termin ‘moc oceny’? 2. jaka jest miara stabilności tego parametru? 3. Jaką wartość tej miary autor uznaje za wystarczającą i dlaczego?
- Na stronie 74. autor pisze, że celem BCI jest *‘znalezienie n [...] najwyższych częstości, które dają największy kontrast stopni wkładu częstości podczas skupiania przez użytkownika uwagi’* – proszę o wyjaśnienie: 1. czy chodzi o najwyższe częstości, czy o częstości, dla których widmo przyjmuje lokalne maksima? 2. co autor rozumie przez ‘wkład częstości’? 3. jak zdefiniowany jest kontrast: w skali liniowej (różnica) czy wykładniczej (stosunek)?
- Na stronie 79. autor pisze, że *‘Osoba używająca BCI była proszona o skupianie się na dźwiękach wysokich bądź niskich, które prezentowane były odpowiednio w lewym bądź prawym kanale audio’* – proszę o wyjaśnienie na jakiej podstawie zachodzi związek kierunku podawania bodźca słuchowego i dotykowego z kierunkiem prezentacji odpowiedzi na ekranie
- Na stronie 98. autor pisze, że *‘...sygnał zawierał zbyt dużą ilość szumu (co było zwykle skutkiem pogorszenia kontaktu jednej z elektrod).’* – Czy w badaniach w klinice nie stosowano ciągłego pomiaru impedancja styku elektroda-skóra, o którym autor wspomina na str. 53?
- Na stronie 95. wspomniano o rejestracji pionowej składowej ruchów oka, a na str. 99. autor pisze, że wykorzystująca ten sygnał *‘Zaproponowana metoda skutecznie usuwała artefakty mrugania, co dodatkowo było kontrolowane wzrokowo przez dwóch niezależnych ekspertów.’* – Mruganie to nie to samo co EOG, poproszę o wyjaśnienie

co autor rozumie przez ‘artefakty mrugania’ i jaki mają związek z rejestrowanymi pionowymi ruchami gałki ocznej?

- Na stronie 104. autor zauważa, że zbiór uczący jest niezrównoważony i proponuje: *„Pomimo faktu, że w paradygmacie odd-ball występuje czterokrotnie więcej odcinków typu niecel niż cel, w dalszej analizie zostały użyte tylko tyle odcinków typu niecel, ile zostało odcinków typu cel po odrzuceniu artefaktów.”* – Proszę o komentarz czy inny sposób selekcji odcinków typu niecel wpłynąłby na uczenie klasyfikatora?
- Na stronie 106. autor pisze: *„ostateczny wynik AUC dla każdego pacjenta jest brany jako maksymalna wartość trzech AUC odpowiadających różnym modalnościom”* – Poproszę o wyjaśnienie dlaczego maksymalna wartość AUC jest wybierana z 3 a nie z 4 testowanych modalności BCI?

Pod względem edytorskim praca napisana jest przyzwoicie, choć autor nie ustrzegł się stylu osobowego, błędów gramatycznych i literowych, oraz żargonu używanego przez programistów. Na wykresach ROC (np. Rys. 4.5) brak opisu osi. Tab. 6.4 ma prawdopodobnie błędny tytuł, podane wartości wydają się być liczbą poprawnych komunikacji dla poszczególnych paradygmatów.

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

4. Wniosek końcowy

Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy, istotny z punktu widzenia potencjalnych zastosowań interfejsów mózg komputer jako narzędzi do obiektywnej oceny zaburzeń świadomości. Pomimo niewielkiej liczności testowanej populacji, praca jest interesująca naukowo, a rozwijanie przedstawionych metod ma potencjał wdrożeniowy. Tematycznie praca związana jest z fizjologią, psychologią, informatyką i elektroniką, zatem wchodzi w zakres dyscypliny Nauki Fizyczne.

Przedstawiona rozprawa doktorska zatytułowana: *„Interfejsy mózg-komputer i zaburzenia świadomości”*, w stopniu zadowalającym spełnia 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. Mariana Dovgialo do publicznej obrony.**

