

Prof. dr hab. Daniel Krzysztof Wójcik

Warszawa, 22.08.2022

Pracownia Neuroinformatyki

Instytut Biologii Doświadczalnej

im. Marcelego Nenckiego PAN

02-093 Warszawa, ul. Pasteura 3

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mariana Dvgialo pt.:

„Interfejsy mózg-komputer i zaburzenia świadomości”

Od stu lat wiadomo, że aktywność elektryczna mózgu, rejestrowana nieinwazyjnie przy użyciu elektrod EEG na skądzie, koreluje z wieloma procesami poznawczymi. Tą własność EEG wykorzystuje się do badania tych procesów poznawczych, a także do budowy interfejsów mózg-komputer (ang. *Brain-Computer Interface*, BCI). Stosunkowo niska rozdzielczość EEG i znacząca odległość od źródeł rejestrowanej aktywności utrudnia uzyskanie stabilnych i wydajnych rozwiązań, dlatego od lat prowadzone są liczne starania by skompensować te fizyczne ograniczenia przez zastosowanie odpowiednich protokołów pracy i nowoczesnych algorytmów zwiększających stabilność wykorzystywanych rozwiązań.

W przedstawionej rozprawie doktorskiej, mgr Marian Dvgialo rozwija kompletny zrąb (ang. *framework*) BCI, który składa się z kilku modułów komunikujących się w czasie prawie rzeczywistym, wykorzystujący zaawansowane metody analizy sygnałów i statystyki, pozwalający ocenić intencję użytkownika na podstawie sygnału EEG. Następnie autor korzysta z konkretnego rozwiązania wykorzystującego ten zrąb do rejestracji i analizy EEG pacjentów z zaburzeniami świadomości kliniki „Budzik” w celu oceny ich poziomu świadomości.

Praca zaczyna się od bardzo skrótowego wstępu na trzy strony, który głównie omawia cele pracy, jej wartość, główne osiągnięcia, oraz zawartość. Odniesienia do dziedziny są minimalne, **brakuje kontekstu dziedzinowego rozprawy**. Następnie autor omawia interfejsy mózg-komputer. Ogólne zasady działania BCI są omówione ponownie na trzech stronach i **ponownie bez odniesień do literatury**.

W rozdziale 2.2 autor opisuje zrąb, czyli platformę programistyczną, systemu BCI, w którego opracowaniu brał udział, w tym jego modułową architekturę. **Nie wiadomo, czy jest to standardowe podejście, czy zupełnie inne od istniejących. Nie wiadomo też dlaczego autor zdecydował się stworzyć**

rozwiązanie autorskie a nie np. wykorzystać istniejące. Następnie, w rozdziałach 2.3 i 2.4, autor opisuje szczegóły implementacji BCI w oparciu o protokoły fali P300 oraz o stacjonarne oscylacyjne bodźce wzrokowe SSVEP. Dopiero tutaj pojawiają się nieco obszerniejsze odniesienia do literatury, w szczególności przy wprowadzeniu wyboru klasyfikatora dla BCI opartego o falę P300. Dokonując wyboru klasyfikatora autor porównał wyniki literaturowe z własnymi testami klasyfikatorów na trzech ochotnikach uzyskując zasadniczo wyniki zgodne z literaturą. Autor szczegółowo opisał procesy przetwarzania sygnałów na potrzeby systemu, kalibrację i komunikację, oraz dobór funkcji decyzyjnej kluczowej dla funkcjonowania systemu. Jako funkcję decyzyjną autor wybiera funkcję logistyczną, **niestety nie dowiadujemy się, czy jest to wybór standardowy, czy w literaturze badano inne funkcje, czy któreś z nich dawały lepsze wyniki, czy może to nie ma znaczenia.** Podobnie dla pozostałych decyzji podjętych przez autora przy rozwoju systemu nie dowiadujemy się czy te decyzje (takie jak ważenie wcześniejszych wyników, ustalanie progu funkcji decyzyjnej, itp.) są jego autorskimi pomysłami, czy też były wybierane wcześniej w literaturze. A jeżeli są to pomysły autorskie, to jakie rozwiązania stosują inne systemy BCI i co skłoniło autora do innego wyboru. Nie wiadomo z rozprawy, czy rozwiązania przyjęte przez autora są nowatorskie, czy to implementacje standardowych rozwiązań znanych z wcześniejszych systemów.

W rozdziale trzecim autor pokazuje przykładową implementację systemu BCI w oparciu o opracowany przez niego zrzęb. Dla mnie jest to walidacja stworzonego oprogramowania, gdzie przy okazji autor odnosi się do kwestii postulowanego analfabetyzmu BCI. W doświadczeniu na 31 ochotnikach autor pokazał, że każdy z nich był w stanie komunikować się w co najmniej jednym z paradygmatów, których zaimplementowano cztery: trzy warianty P300 dla bodźców wzrokowych, słuchowych i dotykowych oraz SSVEP. Bez wątplenia wskazuje to na skuteczność opracowanego systemu. **Szkoda, że także tutaj nie wykorzystano okazji, by pogłębić badane zagadnienie. Ponownie nie wiemy, czy konkretne wykorzystane bodźce to pomysł autora, czy też standardowe podejście w branży.** Czy są jakieś powody, kryteria, dla których takie a nie inne parametry bodźców są wybierane do stymulacji użytkownika systemu. Każdy użytkownik może przecież mieć nieco inną wrażliwość na bodźce różnych modalności, niektóre bodźce mogą być mniej lub bardziej informatywne. Na przykład do sygnalizacji istotności bodźca w modalności wzrokowej autor używa zdjęcia Einsteina, które bez wątplenia wyróżnia się na tle domyślnego ekranu. Tym niemniej bodźce związane bezpośrednio z użytkownikiem (jak własne zdjęcie albo zdjęcie matki) mogą poprawiać uwagę. Autor zdaje sobie z tego sprawę, o czym świadczy zbadanie w kolejnym rozdziale – u pacjentów z zaburzeniami świadomości, gdzie ma to znacznie większe znaczenie – różnych typów bodźców. Czy przy bodźcach

SSVEP wybór funkcji prostokątnej jest istotny czy przypadkowy? Czy sinus byłby lepszy czy gorszy? a może inna funkcja okresowa jest bardziej naturalna z punktu widzenia układu wzrokowego?

Podtytuł rozdziału 3 to 'Badanie analfabetyzmu BCI', jednak w całym tym rozdziale jest tylko jedno odniesienie do literatury, i to wyłącznie do pracy autora, gdzie raportowano przedstawione tu wyniki. Nie ma odniesienia do literatury dotyczącej analfabetyzmu BCI (pojawiała się wyłącznie wzmianka i jeden odnośnik w drugim akapicie wstępu do rozprawy). Nie wiemy, jak szeroko omawiany był w literaturze ten problem, czy był on konsekwencją wcześniejszych słabiej działających systemów i obecnie już się o nim nie wspomina, czy też jest to problem ciągle podnoszony w badaniach BCI a autor się z nim jednoznacznie rozprawił. Oczywiście wysoka skuteczność systemu autora tej kwestii nie zamyka. Należałoby porównać tych samych użytkowników pracujących z dwoma systemami, jednym, w którym pojawiają się problemy z komunikacją raportowane w literaturze, oraz drugim, autora, w którym pokazuje on, że ta sama osoba problemów nie ma, a więc problem nie jest w mózgu użytkownika ale w słabym projekcie systemu BCI.

Najciekawszy naukowo i najsolidniejszy jest rozdział czwarty, 'BCI w diagnozie zaburzeń świadomości', w którym autor pokazuje, że jego system może zostać wykorzystany w celu obiektywizacji diagnostyki stanów zaburzeń świadomości. Autor opracował protokół postępowania do odpowiedniej diagnostyki, a następnie przetestował go na grupie zdrowych ochotników (dorosłych i dzieci) oraz na grupie pacjentów z zaburzeniami świadomości kliniki Budzik.

Zastanawia mnie, czy można zaproponować model zwierzęcy zaburzeń świadomości, który pozwoliłby badać poziom zaburzenia świadomości na innych poziomach niż tylko behawioralny i EEG. Wyobrażam sobie, że różne typy anestezji używane w medycynie mogą prowadzić do stanów, które mogłyby być modelami konkretnych zaburzeń świadomości (patrz np. Bonhomme i wsp. 'General Anesthesia: A Probe to Explore Consciousness' Front. Syst. Neurosci., 14 August 2019; <https://doi.org/10.3389/fnsys.2019.00036>). Alternatywnie, te same przyczyny, które wywołują u ludzi zaburzenia świadomości (udar, urazowe uszkodzenie mózgu, itp.) mogą je wywoływać u zwierząt i być może mogą być podobnie badane. **Czy prowadzi się tego typu badania? Czy autor znalazł jakieś prace idące w tym kierunku?** Takie modele zwierzęce być może pozwoliłyby na głębszą walidację i dalszy rozwój diagnostyki zaproponowanej przez autora.

W rozdziale czwartym w mojej ocenie autor udowodnił, że potrafi sformułować problem badawczy i twórczo i skutecznie go rozwiązać. W szczególności autor pokazał istotną korelację pomiędzy oceną stanu zaburzeń świadomości pacjenta przez specjalistę w oparciu o skalę behawioralną, z wynikami skuteczności komunikacji w systemie BCI autora. Co ciekawe, w jednym przypadku wyniki autora wskazywały na wyższy poziom świadomości pacjenta, niż stwierdzono to



w ocenie behawioralnej. Ponowna ocena behawioralna po 4 miesiącach wskazała również na wyższy stan świadomości pacjenta, zgodny z oceną opartą o procedurę zaproponowaną przez autora, która z kolei pozostała na tym samym poziomie. Sugeruje to, że zaproponowana tu procedura może być bardziej wrażliwa niż ocena behawioralna. Oczywiście, przy jednym takim przypadku na 15 wynik jest po pierwsze anegdotyczny, po drugie, wskazuje na stosunkowo dużą skuteczność oceny behawioralnej. Tym niemniej zagadnienie i wyniki wydają mi się ważne i warte kontynuacji.

Podsumowując, mgr Marian Dvogliano w przedstawionej rozprawie 1. zaprezentował zrzęb programistyczny systemu BCI, który współtworzył, 2. przedstawił walidację konkretnej realizacji systemu BCI z wykorzystaniem opracowanego zrzębu opartą o dwa różne paradygmaty działające w trzech modalnościach, oraz 3. pokazał, jak można wykorzystać opracowany system do diagnostyki poziomu zaburzeń świadomości, czy też do wykrywania świadomych działań u badanych, którzy według standardowych skal behawioralnych nie wykazują takich działań.

Zgodnie z Ustawą oraz odpowiednią uchwałą Senatu Uniwersytetu Warszawskiego recenzent jest zobowiązany stwierdzić, czy recenzowana rozprawa spełnia dwa warunki:

„1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.
2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego albo oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej.”

Nie mam wątpliwości, że warunek drugi jest spełniony. Pod względem merytorycznym, stosowanych metod, oraz przeprowadzonych doświadczeń i analiz, oceniam pracę dobrze. W zakresie warunku pierwszego jednak oceniam pracę nisko. Uwagi autora oraz jego opis własnej pracy świadczą o pewnym rozeznaniu w dziedzinie, **niestety, umiejscowienie prezentowanych wyników na tle literatury i ogólna motywacja wielu fragmentów są słabe**. Oczekuję, że na obronie autor odniesie się do zgłoszonych powyżej uwag, ale także do tych braków, w szczególności poniższych istotnych uwag krytycznych, oraz przekona mnie i komisję, że zna literaturę BCI i potrafi przedstawić przekonująco kontekst swoich badań.

Istotne uwagi krytyczne

Od strony kompozycyjnej największym mankamentem pracy jest jej słabe zanurzenie w kontekście ogólnym. Mamy wstęp na trzy strony, który głównie omawia cele pracy, jej wartość, główne osiągnięcia, oraz zawartość. Brakuje jakiegokolwiek odniesienia do dziedziny. Szybkie

wyszukiwanie hasła 'Brain computer interface' w bazie Web of Science daje prawie 30 tys. publikacji w tym samych artykułów przeglądowych prawie 1500. Autor w całej rozprawie cytuje łącznie 44 pozycje w tym 5 ze swojego zespołu badawczego, jedno doniesienie z prasy popularnej, oraz 14 prac o różnych klasyfikatorach wykorzystywanych w BCI opartym o falę P300 oraz o znaczeniu właściwego doboru bodźców i sposobu ich prezentacji (cytowania [7-20]). Kilka publikacji, które wydają mi się potencjalnie istotne w kontekście rozprawy to np.

- Wolpaw i wsp. 'Brain-computer interfaces for communication and control', Clin. Neurophysiol. 2002 [prawie 5000 cytowań]
- Lotte i wsp. 'A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces', J. Neur. Eng., 2007 [1670 cytowań]
- Schalk i wsp. 'BCI2000: A general-purpose, brain-computer interface (BCI) system' [1587]
- Nicolas-Alonso i Gomez-Gil 'Brain Computer Interfaces, a Review' [1033]
- Lotte i wsp. 'A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update' [627]
- Craik i wsp. 'Deep learning for electroencephalogram (EEG) classification tasks: a review' [326]

itd. Oczywiście są to przykładowe prace, od których ja bym zaczął pewnie przegląd literatury; nie wiem, jakie prace były inspiracją dla autora, ale **oczekuję na obronie przynajmniej zarysowania rozwoju i bieżącego stanu dziedziny w tym wskazania przełomowych prac. Oczekuję, że autor przedstawi główne prace oryginalne oraz przeglądowe, które były dla niego inspiracją.**

W rozdziale 2.1 'Ogólne zasady działania BCI' autor cytuje tylko trzy prace, w tym dwie ze swojej grupy, trzecia jako wskazanie, że niskie częstotliwości stymulacji wzrokowej mogą wywoływać padaczkę. **Czy ogólne zasady działania BCI nie były do tej pory omawiane w literaturze? Należy wykonać ich przegląd.**

Autor twierdzi, że „Współczesne interfejsy mózg-komputer w klasycznej formie działają według poniższego schematu”. Brakuje odniesień literaturowych na poparcie tej tezy. Proszę o wskazanie konkretnych interfejsów oraz cytatów z odpowiednich publikacji, które wspierają tezę autora.

W rozdziale 2.2, gdzie omówiono zrąb BCI opracowany m.in. przez autora brakuje informacji, czy jest to jedyne takie rozwiązanie na świecie, czy są rozwiązania konkurencyjne, a jeżeli tak, to czym one się różnią a w czym są podobne do rozwiązania autora. Np. jak ma się rozwiązanie autora do BCI2000 czy OpenBCI? Czy są inne rozwiązania? Jakie były argumenty za opracowaniem nowego rozwiązania zamiast wykorzystania istniejących? **Oczekuję na obronie omówienia obecnie istniejących rozwiązań BCI, wystarczy opartych o EEG, komercyjnych i otwartych, oraz wskazania podobieństw i**



różnic między nimi, a także przedstawienie motywacji do stworzenia systemu autorskiego zamiast adaptacji istniejącego rozwiązania.

Na s. 7 autor pisze „Odczyt aktywności mózgu można realizować technikami funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (fMRI), spektroskopii bliskiej podczerwieni (NIRS) lub EEG.” Czy ktoś takie rozwiązania zbudował, testował? Znowu nie ma żadnych odnośników do literatury. **Proszę o odpowiednie wsparcie przedstawionej tezy i prezentację przykładowych rozwiązań na obronie.**

W rozdziale trzecim podkreślane jest znaczenie przedstawionych wyników dla problemu analfabetyzmu BCI, który jest tylko wspomniany. **Na obronie oczekuję szerszego omówienia tego zagadnienia i przeglądu literatury.** Gdzie autor widzi słabość tej linii rozumowania oraz jak się mają wyniki autora z tego rozdziału w kontekście problemów zgłaszanych w literaturze. Czy używano tych samych protokołów, czy różnych? Czy zgłaszane problemy z komunikacją w BCI to jest kwestia protokołu, modalności, słabego oprogramowania czy sprzętu, elektrod, itd? Trzeba tu również skomentować wybór bodźców: czy mają znaczenie, czy nie? Jeżeli tak, jak podjęto decyzję o takim a nie innym wyborze? Jeżeli nie mają znaczenia, skąd wiadomo, że nie?

Drobne uwagi

Na niektórych rysunkach autor pokazuje przykładowe ekrany aplikacji ‘panel kontrolny’, np. Rys. 2.4, 2.6, 2.7, inny zrzut ekranu na rys. 4.2. Rysunki te zyskałyby na wydobyciu z interfejsu i pokazaniu ich w powiększeniu, bo często ich opisy i legendy są nieczytelne.

Żeby poprawnie wydrukować pracę przygotowaną w LaTeXu do druku dwustronnego należy pamiętać o dołożeniu pustych stron w odpowiednich miejscach, np. po stronie xii przed stroną 1, żeby 1. numery stron były widoczne na zewnętrznych rogach, oraz 2. strony nieparzyste leżały po prawej.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. Mariana Dvgialo spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim – chociaż w zakresie wprowadzenia do dziedziny i ogólnej motywacji bardzo słabo – i dlatego w oparciu o przepisy Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym wnoszę do Wysokiej Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab. Daniel K. Wójcik