



NEUROGRANICE

Dzięki mózgowi pokonujemy kolejne granice poznania. Jednocześnie zgłębianie tajemnic mózgu stawia granice najtrudniejsze do przekroczenia.

Piotr Durka

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Krzysztof Dereziński

Wydział Filozofii i Nauk Społecznych
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Zasadnicza granica została opisana co najmniej pół wieku temu w często cytowanym stwierdzeniu Emersona Puga: „Gdyby mózg człowieka był wystarczająco prosty, żebyśmy mogli go zrozumieć, byłibyśmy na to za prości”. Mimo to w ostatnich

latach coraz częściej słyszymy o „kopiowaniu ludzkiej świadomości do pamięci komputera” i „czytaniu myśli”. We współczesnym świecie, gdzie każda informacja jest zapisywana jako ciąg zer i jedynek, łatwo zapominać o tym, że aby coś odczytać, musimy znać i rozumieć kod. Bez tego nie będziemy umieli nawet skopiować informacji – do tego potrzebna jest wiedza o tym, jakie napięcia i namagnesowania w brankach logicznych i pamięciach odpowiadają konkretnym stanom. Kodowanie informacji w mózgu jest nieporównanie bardziej skomplikowane.

Odczyt informacji to kolejna warstwa abstrakcji oprócz wspomnianego ciągu zer i jedynek – w przypadku mózgu zastąpionych przez potencjały i burze neuroprzekazników wokół neuronów. Nawet gdyby ten kod był tak prosty jak kod stworzony przez człowieka dla komputerów, to wciąż musielibyśmy znać

format. Niestety – nie znamy. Z drugiej strony, neuronauki są jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin, z ogromną liczbą spektakularnych sukcesów, co powoduje wiele nieporozumień, których wyjaśnienie jest celem pierwszej części niniejszego tekstu.

Mózg i klasyczne interfejsy mózg-komputer

• Mózg człowieka a mózg robaczka

W mózgu człowieka jest niemal 100 mld neuronów. Wiele z nich tworzy dziesiątki tysięcy połączeń z innymi. Mózg każdego człowieka jest inny – nawet w skali makroskopowej neurogeneza wykształca u nas w trakcie dojrzewania różne pofałdowania kory, nie mówiąc o zmiennych połączeniach między konkretnymi neuronami, które wbrew temu, co było dogmatem jeszcze całkiem niedawno, mogą nie tylko umierać, lecz także powstawać w dorosłym, ukształtowanym już mózgu. Tak więc schemat połączeń neuronów w mózgu człowieka jest znany tylko w sensie statystycznym. To wyjaśnia podstawowe problemy neuronauk: nie jest łatwo badać strukturę, której każdy egzemplarz jest inny i która w dodatku zmienia się dynamicznie w czasie.

Dlatego podstawowe badania koncentrują się najczęściej na znacznie prostszych organizmach, z których najbardziej znany jest nicieniek *Caenorhabditis elegans*. Jego ciało składa się z 959 komórek, z których 302 to neurony. I co najważniejsze – znamy dokładny schemat połączeń między tymi neuronami. Jest stały za życia każdego osobnika i jednakowy u wszystkich z nich! Zrozumienie działania takiego „mózgu” jest więc absolutnie niewyobrażalnie łatwiejsze niż zrozumienie działania mózgu człowieka.

Co w takim razie oznacza „zrozumienie”? W kulturze europejskiej to zwykle „powiedzenie własnymi słowami”, w nauce – wyrażenie językiem równań, czyli stworzenie modelu matematycznego. Kiedy stworzymy kompletny model układu nerwowego *C. elegans*, będziemy mogli „przenieść go do komputera” i dokładnie odtworzyć jego reakcje i zachowanie, jak choćby charakterystyczny wijący ruch umożliwiający przemieszczanie. Dokładne odtworzenie struktury połączeń między neuronami (tzw. konektomu) udało się 35 lat temu. Pozostało już tylko „przenieść do pamięci komputera i uruchomić sztucznego robaczka”. Pracuje nad tym nieprzerwanie wiele wspaniałych zespołów naukowców i na razie jeszcze się to nie udało. Postępy można śledzić np. na stronie <http://openworm.org>.

• Interfejsy mózg-komputer

Po tym kubku zimnej wody możemy przejść do sukcesów neuronauk. Oczywiście nie da się w krótkim artykule omówić stanu wiedzy tak ogromnej gałęzi nauki, dlatego skoncentrujemy się na jednym z po-

popularniejszych przykładów, czyli interfejsach mózg-komputer (*brain-computer interfaces*, BCI). W początkach dziedziny mówiło się o interfejsach mózg-maszyna (*brain-machine interface*, BMI), ale bardzo szybko okazało się, że między mózgiem a maszyną musi stać komputer, a połączenie komputera z maszyną to już prosta sprawa. Tak więc klasycznie BCI definiowaliśmy jako system umożliwiający komunikację z komputerem bez pośrednictwa mięśni. Jeśli usunąć ten warunek, za BCI uznalibyśmy również myszkę i klawiaturę, które niewątpliwie umożliwiają komunikację z komputerem, przekazując intencje generowane w mózgu.

Najpowszechniejszym sposobem na implementację tej idei jest oparcie systemu na odczycie fal mózgowych, czyli starego, dobrego elektroencefalogramu (EEG). Za jego odkrywcę można uznać polskiego badacza Adolfa Becka, który w ramach obronionej w 1891 roku pracy doktorskiej *Oznaczenie lokalizacji w mózgu i rdzeniu za pomocą zjawisk elektrycznych* badał potencjały związane z ruchem i bodźcami na korce mózgowej zwierząt doświadczalnych (w zasadzie to samo umożliwiają współczesne urządzenia firmy Neuralink, ale są mniejsze, bezprzewodowe i dają się wszczepić pod czaszkę). Przy okazji tych badań Beck odkrył i opisał „aktywny prąd niezależny”, czyli właśnie EEG. Po publikacji odkrycia w międzynarodowym czasopiśmie „Centralblatt für Physiologie” okazało się, że wspomnienie (bez dogłębnego jak u Becka studium) tego zjawiska pojawiło się wcześniej w krótkim zdaniu w raporcie z grantu Richarda Catona, którego uznano za odkrywcę.

Wracając do współczesnych BCI, których podstawą jest EEG: ich działanie opiera się na odczycie z EEG śladów koncentracji uwagi na migających symbolach (którym są przypisywane znaczenia), odzwierciedlanych w tzw. potencjałach wywołanych (*evoked potentials*, EP), lub na rozróżnianiu wyobrażeń ruchu kończyną (*motor imagery*, MI). W tym drugim przypadku nie jest to niestety bezpośrednio odwzorowanie wyobrazonego ruchu, ale zaledwie 1–2 bity wynikające z rozróżnienia, której kończyny dotyczy wyobrażenie. Dokładniejsze wyjaśnienie wykracza poza ramy objętościowe tego artykułu, dlatego zainteresowanych zapraszamy do popularnych prezentacji i animacji przygotowanych przez firmę BrainTech przy okazji realizacji projektu POIR.01.01.01-00-0573/15 „Interfejsy mózg-komputer”, pod adresem <https://braintech.pl/bci>.

BCI w Polsce

Interfejsy mózg-komputer na świecie są rozwijane od dziesięcioleci. Za symboliczny początek tych badań w Polsce można uznać pierwszy publiczny pokaz działania BCI na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w czerwcu 2008 roku. Od tego czasu nie tylko polscy naukowcy dołączyli do światowej czołówki, lecz



prof. Piotr Durka

Przeprowadził pierwszy w Polsce pokaz działania interfejsu mózg-komputer (2008), wdrożył pierwsze w świecie studia neuroinformatyki (2009, UW). Założyciel firmy BrainTech, dostarczającej kompletne systemy BCI. <http://durka.info>
durka@fuw.edu.pl



Krystian Dereziński

Jest neurobiologiem zajmującym się badaniem i rozwijaniem systemów wykorzystujących aktywność neuronalną do optymalizacji psychofizycznych możliwości człowieka. Obecnie pracuje nad zagadnieniami związanymi z dostosowywaniem treści do preferencji użytkownika.
neuro@umk.pl

także najnowocześniejsze technologie z tej grupy stały się dostępne w kraju dzięki działalności takich firm jak wspomniana wcześniej BrainTech, która jako jedna z niewielu na świecie dostarcza stworzone od podstaw kompletne (sprzęt i oprogramowanie) rozwiązania BCI dla przemysłu, edukacji i badaczy. Firma oferuje też unikatowe w skali światowej urządzenie umożliwiające detekcję koncentracji uwagi na wybranych fragmentach ekranu, bazujące na potencjałach wywołanych stanu ustalonego. I najważniejsze: specjalistów światowej klasy kształcą m.in. pierwsze na świecie studia neuroinformatyki, prowadzone od 2009 roku na Uniwersytecie Warszawskim.

Przykładem zastosowania technologii BCI poza formalnymi ramami dziedziny są badania zaburzeń świadomości, prowadzone na Uniwersytecie Warszawskim we współpracy z warszawską kliniką Budzik i Fundacją Światło z Torunia. Tu też mamy do czynienia z przełamywaniem granicy, do której dotarła współczesna medycyna, opierająca się na pętli sprzężenia zwrotnego, w której kluczowym elementem jest ocena postępów leczenia. W przypadku złamań czy ran zewnętrznych postępy gojenia możemy ocenić w miarę obiektywnie, ale jeśli schorzenia są związane z działaniem mózgu, konieczna jest komunikacja z pacjentem. W przypadku spektrum zaburzeń świadomości (potocznie określanymi mianem śpiączki) właśnie ta komunikacja jest zaburzona bądź „wyłą-

czona”, przynajmniej w klasycznej formie mowy czy gestów. I tu właśnie wykorzystujemy technologie BCI, stworzone w BrainTech.

Quo vadis BCI A.D. 2021

Powyższy opis odnosi się do klasycznego rozumienia pojęcia BCI. Początkowo my, naukowcy, koncentrowaliśmy się na próbach poprawienia szybkości przekazu informacji, ale dość szybko natrafiliśmy na granice. W tym przypadku realną granicą szybkości komunikacji dostępnych obecnie interfejsów są setki bitów na minutę, dużo wolniej niż klasyczne środki komunikacji z komputerem. Niestety, granica ta jest przesuwana niezmiernie powoli – od kilkunastu lat w rozwiązaniach, które mają szansę na stosowanie w praktyce, postęp jest raczej niewielki. Dlatego zamiast do przodu dziedzina zaczęła się rozwijać na boki. Najpierw powstało pojęcie „hybrydowych BCI”, czyli systemów komunikacji, w których odczyt fal mózgowych jest wspomagany dodatkowym kanałem mięśniowym, np. ruchem gałki ocznej czy głowy – co było czasami konieczne przy wykorzystaniu BCI w sytuacjach wymagających szybkiej i pewnej reakcji. Równoległe pojawiło się pojęcie „pasywnych BCI”, czyli odczytywania z EEG stanu behawioralnego (zmęczenia, koncentracji itp.). Faktycznie jest to po prostu stare, dobre EEG, ale nowa nazwa daje większą rozpozna-

Popularnonaukowe objaśnienie działania interfejsów mózg-komputer na stronach <https://braintech.pl/bci>

BrainTech Oferta BCI Oprogramowanie O nas Kontakt Oferta

Brain-Computer Interface (BCI) to system umożliwiający sterowanie komputerem bez użycia mięśni.

BrainTech tworzy BCI oparte o elektroencefalogram (EEG) — elektryczny ślad myśli, rejestrowany z powierzchni głowy.

W opisanych poniżej przypadkach daje się z tego śladu odczytać świadome intencje użytkownika, które BCI przetwarza na komendy sterujące komputerem.

JAK DZIAŁA INTERFEJS MÓZG-KOMPUTER?

- SSVEP
- P300 WZROKOWY
- P300 SŁUCHOWY
- P300 CZUCIOWY

walność i siłę przebicia. W ten właśnie sposób dzięki popularności BCI obserwujemy wspaniałą renesans elektroencefalografii nie tylko w klasycznej formie, lecz także w wielu nowatorskich i ciekawych zastosowaniach. Ponadto technologia – zarówno sprzęt, jak i oprogramowanie – wykorzystywana w tych dziedzinach jest bardzo zbliżona do klasycznego BCI. Dlatego przedstawiony powyżej klasyczny opis należy uzupełnić o głos młodego pokolenia neurohakerów, zafascynowanych zastosowaniami neurotechnologii.

Przyszłość BCI jest już dzisiaj, czyli nowe zastosowania

• Neurohacking i zastosowania przyszłości

Wspomniane w poprzedniej części ograniczenia BCI odnoszą się do standardowych, sprawdzonych w praktyce metod, wykorzystujących nieinwazyjny odczyt EEG z powierzchni głowy. Jednak dzięki rosnącej popularności tej dziedziny i mnogości prowadzonych badań i projektów można przytoczyć wiele jednostkowych, ale bardzo optymistycznych przykładów wskazujących na dalsze możliwości postępu.

• Pisanie bez pisania

W zeszłym roku zespół z Uniwersytetu Stanforda zaprezentował system oparty na wewnątrzkorowym interfejsie mózg-komputer, za pomocą którego badaczom udało się dekodować wyimaginowane ruchy pisania z kory motorycznej i w czasie rzeczywistym tłumaczyć je na tekst. Prędkość, jaką osiągnął jedyny uczestnik badania, wynosiła 90 znaków na minutę, co jest porównywalne z szybkością, z jaką na smartfonach piszą osoby zdrowe (115 znaków na minutę). Warto oczywiście dodać, że zaprezentowany w artykule projekt dotyczył tylko jednego badanego, zabieg montażu elektrod był inwazyjny (wymagał pracy na otwartym mózgu), badany odbył długotrwały trening i nie jest to technologia typu „plug and play” (podłącz i używaj). Niemniej jednak projekt spotkał się ze sporym uznaniem w branży neurotechnologii i nadal robi olbrzymie wrażenie. Świadczy o tym choćby pierwsze miejsce na prestiżowym konkursie The Annual BCI Award 2020.

• Egzoszkielet połączony z mózgiem

W innym projekcie zespół z Uniwersytetu w Grenoble opracował system BCI pozwalający użytkownikowi na sterowanie egzoszkieletem (tj. przenośnym bionicznym szkieletem przeznaczonym m.in. do reedukacji chodu). Tutaj także badania opierały się na inwazyjnym BCI – kiedy to elektrody wszczepiono pod czaszkę. W internecie są dostępne nagrania z testów, gdzie sparaliżowany od szyi w dół mężczyzna może samodzielnie chodzić i dotykać dłońmi wybranych punktów. Oczywiście jest to wspaniałe rozwiązanie



dla osób dotkniętych tetraplegią (paraliżem cztero-kończynowym), jednak nietrudno wyobrazić sobie wiele innych zastosowań, do których materializacji mogłoby w niedługim czasie dojść.

• Neuroprotezy w chorobie Parkinsona

W starzejących się społeczeństwach na choroby neurodegeneracyjne cierpi coraz więcej osób. Przykładem może być choroba Parkinsona – neurodegeneracyjna choroba układu pozapiramidowego odpowiadającego za wykonywanie ruchów. W późnej fazie choroby deficyty chodu i równowagi słabo reagują na powszechnie dostępne terapie, takie jak wskazówki sensoryczne, strategie zastępowania dopaminy czy głęboka stymulacja mózgu (DBS). W 2020 roku szwajcarskie centrum NeuroRestore, kierowane przez prof. Grégoire’a Courtine’a, zaprezentowało neuroprotezę, która pozyskiwała sygnały neuronowe z kory ruchowej, przetwarzała je, wnioskowała o zamierzonych ruchach, a następnie wysyłała bezprzewodowo polecenia do układu stymulacji rdzenia kręgowego w sposób, który wzmacnia zamierzone ruchy, przez co znacznie łagodzi chód parkinsonowski i deficyty równowagi w modelu choroby u naczelnych innych niż człowiek. Prace Szwajcarów przywracają wielu osobom nadzieję na funkcjonowanie ich bliskich albo ich samych.

Co dalej?

Można ostrożnie przyjąć, że w najbliższym czasie w neurotechnologii pojawi się wiele nowych rozwiązań. Połączenie postępującej miniaturyzacji elektroniki, ciągłego wzrostu mocy obliczeniowej komputerów, nowych algorytmów sztucznej inteligencji oraz coraz szybszego i powszechniejszego internetu pozwalają na przewidywanie dalszego wzrostu zainteresowania tematem BCI i jego dynamicznego rozwoju. Oczywiście dobrze jest mieć świadomość nie tylko ograniczeń, lecz także możliwości – ich wypadkowa może nas jeszcze nieraz zaskoczyć. ■

Rosnące zainteresowanie neurotechnologiami powoduje pojawianie się na rynku mobilnych, prostych w obsłudze i dostępnych cenowo systemów do monitorowania aktywności neuralnej. Na ilustracji studentki testują urządzenie rejestrujące sygnał EEG

Chcesz wiedzieć więcej?

www.braintech.pl/BCI/

www.klinikabudzik.pl/pl/badania-eeeg