Mózg, maszyny i manipulacje

Czy bezpośrednie połączenie mózgu z maszyną to tylko science fiction?

Piotr Durka

Sparaliżowany Matt Nagle jest w stanie kontrolować kursor na ekranie komputera za pomocą świadomie generowanej aktywności mózgu.

zdjęcie objęte prawami autorskimi

Ludzki mózg składa się z prawie biliona komórek, zwanych neuronami. Każdy neuron może tworzyć tysiące połączeń z innymi. Po tych połączeniach płyną niewielkie prądy, które przekazują pobudzenia między neuronami. Jeśli suma pobudzeń docierających do któregoś z neuronów będzie odpowiednio duża, zacznie on również rozsyłać impulsy pobudzające lub hamujące inne neurony. Tak działa mózg.

Uprośćmy ten model jeszcze bardziej i załóżmy, że każde połączenie ma dokładnie taką samą siłę. Wtedy tym, co odróżnia od siebie różne mózgi – albo różne stany tego samego mózgu – byłaby tylko specyficzna sieć połączeń między neuronami. Ile jest możliwości takich „prostych" połączeń? Niewyobrażalnie wiele. Nieporównanie więcej niż największe liczby, które potrafimy odnieść do czegoś konkretnego, jak ok. 100 000 000 000

a potem przekazywany do siłowników (mięśni) przez przewody sterujące (motoneurony). Taki schemat wykształciła ewolucja, do niego przystosowywały się nasze mózgi od milionów lat. Dopiero ostatnie stulecia zmieniły zasadniczo rolę mięśni: z ostatecznego wykonawcy ruchów zaplanowanych w mózgu stały się pośrednikiem w wydłużonym łańcuchu sterowania, w którym pojawiły się takie elementy dodatkowe jak kierownica, pedały, joystick, mysz, gamepad i klawiatura. Czy można wyeliminować te niewygodne elementy pośrednie i podłączyć sterowanie bezpośrednio do mózgu? Tak jak w filmach „Matrix", „SpiderMan 2", „Surogaci", „Avatar"...

Interfejs mózg-komputer

Interfejs – ta kalka angielskiego *interface* – gości oficjalnie w naszym języku od ponad dekady. Oznacza zwykle styk różnych systemów, które mają się komunikować.

Brain-Computer Interface (BCI, interfejs mózg-komputer) to już nie science fiction, ale przedmiot badań naukowych ostatnich dziesięcioleci. Ich celem jest „uwolnić mózg z ograniczeń nałożonych przez ciało i umożliwić mu używanie wirtualnych, elektronicznych i mechanicznych narzędzi do kontrolowania świata fizycznego. Tylko za pomocą myśli".* To marzenie możemy uznać za definicję dziedziny, na wszelki wypadek dodając: „bez pośrednictwa mięśni". Wszak jeśli dozwolić na udział mięśni, to interfejsem mózg-komputer staną się też myszka i klawiatura.

Pomimo silnego zakotwiczenia w kinowych archetypach i marzeniach nie chodzi tu wyłącznie o pokonywanie kolejnych barier *per se*. W kolejce do wykorzystania wyników tych badań, przed wojskiem i przemysłem rozrywkowym, czekają pacjenci. Najokrutniejszą wśród chorób ograniczających możliwości komunikacji jest stwardnienie zanikowe boczne (*amyotrophic lateral sclerosis*, ALS) – choroba neurodegeneracyjna, która niszczy tylko wspomniane powyżej motoneurony. Nietknięta pozostaje zwykle reszta mózgu – inteligencja, uczucia, pamięć i to, czego nie zdążyliśmy powiedzieć bliskim, zanim choroba odebrała wszelkie możliwości komunikacji. Bo przecież bez motoneuronów, czyli kabli wiodących od mózgu do mięśni, nie da się mięśniami sterować. A bez mięśni nie wydamy głosu, nie napiszemy esemesa, nie mrugniemy okiem.

Jeszcze niedawno zakłócenia w sterowaniu mięśniami oddechowymi czy pokarmowymi prowadziły do szybkiej śmierci, ale współczesna medycyna dysponuje już respiratorami i paliatywną terapią żywieniową. Nie potrafimy tylko zapewnić komunikacji z ostatnim poprawnie działającym organem. Nietknięty mózg, wraz z kompletnymi zasobami pamięci, wszystkimi niedokończonymi sprawami i tym, czego nie zdążyliśmy powiedzieć bliskim, pozostaje odcięty od reszty świata, bez możliwości przekazania jakiejkolwiek informacji – choćby „odłączcie mnie".

Zespół zamknięcia

Jak takie piekło wygląda od środka, możemy próbować sobie wyobrazić czytając książkę „Skafander i motyl", którą napisał francuski dziennikarz Jean-Dominique Bauby. Napisał albo raczej wymrugał, bo po wylewie znalazł się w tzw. stanie zamknięcia (*locked-in state*) – mógł kontrolować tylko jedną powiekę. Ortofonistka czytała powoli kolejne litery alfabetu i zapisywała tę, przy której Bauby mrugnął. W ten sposób nie tylko pisał książkę, ale też prosił o zgaszenie światła czy włączenie telewizora.

Z ALS zmaga się znany astrofizyk Steven Hawking, który jest w stanie kontrolować ruchy oczu – jest w lepszej sytuacji niż pacjenci w tzw. stanie całkowitego zamknięcia (*completely locked-in state*), u których nie działają już żadne mięśnie. Hawking porozumiewa się za pomocą urządzenia zwanego *eye tracker*, które tłumaczy ruch oka na ruch kursora po ekranie i pozwala mu samodzielnie wybierać kolejne litery.

Ludzi, dla których największym problemem jest komunikacja ze światem zewnętrznym – chorych i ofiar wypadków – jest znacznie więcej, niż nam się wydaje. Poza skrajnymi przypadkami najczęściej są w stanie kontrolować te czy inne zespoły mięśni, dzięki którym można próbować konstruować specjalne sposoby komunikacji, dostosowane do konkretnych sytuacji, jak w przypadku Hawkinga czy Bauby'ego. Nie są to interfejsy mózg-komputer, bo ruch oka czy mrugnięcie wymagają udziału mięśni. Jeśli chcemy komunikację od mięśni uniezależnić, intencje odczytywać trzeba bezpośrednio z mózgu.

Jak czytać myśli (a konkretnie wspomnienia z przyszłości), pokazuje na przykład film „Raport mniejszości" (czytaj o nim też s. 53), elegancko umieszczający science fiction w kontekście istniejących technologii. Jest wśród nich spektroskopia bliskiej podczerwieni (*Near Infrared Spectroscopy*, NIRS), używana faktycznie w badaniach mózgu. Światło generowane przez diody laserowe jest w tej technice dostarczane wiązką światłowodów do optod (specjalnych czujników) na powierzchni głowy, które mierzą też światło odbite. Rozbieżność scienc fiction i rzeczywistości polega tylko na tym, że w mierzonym sygnale nie ma czytelnego zapisu obrazów wspomnień, tylko obrazy zmian ukrwienia w okolicy mózgu, nad którą umieszczono optody. Związek tej informacji z pracą mózgu jest dość daleki i pośredni: jeśli w jakimś obszarze neurony będą pracować dużo intensywniej, zwiększy się zużycie energii, a zatem i zapotrzebowanie na tlen, co pokaże NIRS – ale z kilkusekundowym opóźnieniem i raczej proporcjonalnie do ogólnego wydatku energii, a nie „ważności" danej myśli. Podobne opóźnienie będzie występować w obrazowaniu funkcjonalnym rezonansem magnetycznym (*functional magnetic resonance imaging*, fMRI). Żeby uniknąć tych opóźnień i niejednoznaczności, należy „podłączyć się" do mózgu bezpośrednio drogą elektryczną.

Neuroinformatyka

Złożoność i obszerność dostępnej o mózgu wiedzy wymusiła w końcu powstanie nowej gałęzi nauki – neuroinformatyki. Ta ściśle interdyscyplinarna dziedzina wiedzy, łącząca elementy informatyki, biologii, kognitywistyki, neurokognitywistyki, sztucznej inteligencji, psychologii, medycyny, fizyki i matematyki, promowana jest od kilku lat przez międzynarodową organizację International Neuroinformatics Coordinating Facility (http://incf.org). W 2009 r. ruszyły w Warszawie pierwsze na świecie studia licencjackie w tej dziedzinie (http://neuroinformatyka.pl). W ich programie znajdują się m.in. interfejsy mózg-komputer.

Z wnętrza mózgu do komputera

Na przełomie XX/XXI w. naukowcy potrafili już odczytywać impulsy z kory mózgowej zwierząt doświadczalnych. Miguel Nicolelis z Duke University implantował elektrody w mózgach małp, w obszarach odpowiedzialnych za ruch. Małpy uczyły się prostej gry komputerowej, wymagającej kontroli kursora za pomocą joysticka. W tym czasie naukowcy „podsłuchiwali" sygnały z odpowiednich fragmentów mózgu i szukali ich związków z ruchem kursora. Gdy udało się znaleźć wystarczająco ścisły związek impulsów rejestrowanych przez sto elektrod w korze ruchowej małpy z ruchem kursora po ekranie, przełączali sterowanie z joysticka na sygnały z elektrod. Po pewnym czasie małpa zauważała, że nie musi już ruszać ręką, żeby kontrolować kursor – wystarczy aktywność mózgu.

Niedługo później podobnej sztuki dokonał przedstawiciel homo sapiens. Matthew Nagle, cierpiący wskutek pchnięcia nożem na paraliż czterokończynowy, zgłosił się w 2004 r. jako pierwszy ochotnik do testów systemu BrainGate firmy Cyberkinetics. Operacja polegała na umieszczeniu macierzy 100 elektrod (każda długości 1 mm i szerokości 90 mikronów, cała macierz mniejsza od dziesięciogroszówki) w odpowiednim obszarze mózgu. Gdy zamknięto jego czaszkę tytanowymi śrubami, złote kable od elektrod zostały wyprowadzone na zewnątrz i zakończone wtyczką. Po trzech tygodniach rekonwalescencji i podłączeniu wtyczki do komputera, odczytującego i przetwarzającego aktywność neuronów kory ruchowej, Nagle był w stanie kontrolować kursor za pomocą świadomie generowanej aktywności mózgu. W tym przypadku naukowcy nie mieli do dyspozycji wzorców aktywności generującej „prawdziwy" ruch z czasów przed urazem rdzenia.

Maszyna wpływa na mózg: fantomatyka i teorie spiskowe

Implanty mózgowe (*brain chips*) wielu ludziom kojarzą się z teoriami spiskowymi i antyutopiami. Bezpośrednia kontrola mózgu w kinie i literaturze jest przedstawiana tak przekonywająco, że coraz więcej ludzi zaczyna podejrzewać, iż stali się przedmiotem takich eksperymentów. A ponieważ, jak opisano powyżej, technologia wszczepiania pod czaszkę układów elektronicznych to już nie science fiction, warto przez chwilę przyjrzeć się dokładniej historii i faktycznym możliwościom bezpośredniego wpływania na mózg.

Najstarszym sposobem zdalnej kontroli mózgu za pomocą prądu elektrycznego jest znana od ponad stulecia galwaniczna stymulacja przedsionkowa (*galvanic vestibular stimulation*, GVS). Nie ma tu potrzeby otwierania czaszki, wystarczy za uszami przykleić dwie elektrody i przepuścić przez nie słaby prąd stały, a właściciel uszu zacznie się zataczać w stronę elektrody, na której był potencjał dodatni – tak stymulacja oszukuje układ równowagi. Jest to zapewne wynik wpływu prądu na sygnały przekazywane do mózgu z ucha wewnętrznego. I choć do końca nie rozumiemy jego mechanizmu, efekt ten jest od dziesięcioleci wykorzystywany w badaniach układu równowagi. Ostatnio przeżywa renesans na fali zainteresowania interfejsami mózg-komputer. Pojawiają się w Internecie „przerażające" filmy pokazujące „zdalnie sterowane istoty ludzkie" oparte na prostym efekcie: gdy idziemy, naturalną reakcją na nagłe wrażenie silnego pochylenia jest zmiana kierunku. Powstają też projekty urozmaicenia gier komputerowych o wrażenia „przechyłu na zakręcie".

Kolejną ogólnoświatową grupą „spiskowców", wszczepiających pacjentom pod czaszki elektronikę wysyłającą do mózgu impulsy, są otolaryngolodzy. Najsłynniejszym w Polsce przedstawicielem tej „konspiracji" jest prof. Henryk Skarżyński, który jako pierwszy w Europie Środkowej dokonał w 1992 r. wszczepienia implantu ślimakowego, przywracając słuch osobie głuchej. Elektroda wszczepiona w ślimaku przekazuje impulsy przetworzone przez znajdujący się na zewnątrz czaszki procesor, który na podstawie sygnałów z mikrofonu stara się odtworzyć impulsy generowane przez zdrowe ucho. Dzięki implantom ślimakowym 200 tys. osób na świecie odzyskało możliwość rozumienia mowy i normalnego funkcjonowania. Wczesne wszczepienie implantu głuchemu lub głęboko niedosłyszącemu dziecku (pierwszy zabieg w Polsce w 2004 r.) daje szansę na jego normalny rozwój.

Choć jest to obecnie najdoskonalsza z technologii symulujących i zastępujących działanie ludzkich zmysłów, to wciąż daleko nam do doskonałości przewidzianej w eksperymencie myślowym Kartezjusza. W rozważaniach nad rzeczywistością wprowadził on w 1641 r. pojęcie demona, który potrafiłby wytworzyć doskonałą iluzję świata zewnętrznego, innych osób oraz własnego ciała tak, że człowiek nie mógłby się zorientować, iż to iluzja. 323 lata później w „Summa Technologiae" Stanisław Lem użył określenia fantomatyka, dziś mówimy po prostu o wirtualnej rzeczywistości. Nie ma to wiele wspólnego z wrażeniami dźwięku, które dają współczesne implanty ślimakowe – pozwalają one zaledwie na rozumienie mowy.

Lobotomia czy implant?

Jednak konkretne próby wpływu na zachowanie człowieka przez ingerencję w mózg to nie tylko wytwór teorii spiskowych. W grudniu 1888 r. Gottlieb Burckhardt otworzył erę psychochirurgii operując różne fragmenty płatów czołowych i ciemieniowych sześciu pacjentów prywatnego szpitala psychiatrycznego w Szwajcarii, wykazujących silne zaburzenia psychiczne różnej natury. Wskutek operacji u jednego z pacjentów wystąpiły ataki epileptyczne i zmarł po pięciu dniach, drugi

Interfejsy mózg-komputer w Polsce

Pierwszy publiczny pokaz interfejsu mózg-komputer w Polsce odbył się w czerwcu 2008 r., z kilkunastoletnim opóźnieniem w stosunku do reszty świata. W latach 2007–09 odmawiano finansowania tych badań z budżetu państwa jedynej w kraju zajmującej się nimi grupie (w skład zespołu wchodzili fizycy z Uniwersytetu Warszawskiego, potem także psycholodzy, informatycy i lekarze). Dopiero udział w projekcie europejskim BRAIN pozwolił na dogonienie światowej czołówki dzięki dostępowi do nowatorskich rozwiązań sprzętowych i informatycznych (por. http://openbci.pl).

wykazał poprawę, lecz później popełnił samobójstwo, z pozostałej czwórki połowa nie wykazała zmian, a dwie osoby stały się „spokojniejsze". Po tych nie najlepszych wynikach na jakiś czas przeważyła maksyma *primum non nocere,* czyli przede wszystkim nie szkodzić.

W roku 1935 r. znów powróciła idea *melius anceps remedium quam nullum,* według której akcja jest lepsza od bezczynności. Portugalski lekarz i neurolog Edgar Moniz opracował procedurę niszczenia części płatów czołowych mózgu (za którą uzyskał Nagrodę Nobla w 1949 r.). Potem Walter Freeman opracował „uproszczoną" jej wersję. Szpikulec do lodu, wprowadzany przez oczodół pod uniesioną powieką, z pomocą młotka przebijał cienką w tym miejscu kość – wystarczyło już tylko kilka ruchów szpikulca na boki, aby wystarczająco uszkodzić połączenia kory przedczołowej ze wzgórzem. Dzięki temu procedura mogła być stosowana nie tylko w szpitalach przystosowanych do zabiegów chirurgicznych – z braku sprzętu do anestezji zalecano znieczulenie przez elektrowstrząsy.

Do końca lat 60. poddano lobotomii ok. 80 tys. osób, w tym połowę w USA. U niektórych pacjentów zabieg powodował poprawę, ale częstymi skutkami była też apatia, brak zdolności do planowania i podejmowania inicjatywy, zaburzenia pamięci czy utrata zdolności do wyrażania emocji. Szkody te były nieodwracalne.

Poszukiwaniu procedury mniej drastycznej, i przede wszystkim odwracalnej, poświęcił się José Manuel Delgado, hiszpański fizjolog, profesor Uniwersytetu Yale. W latach 50. zaczął wszczepiać neurostymulatory w mózgi zwierząt i ludzi (w tym drugim przypadku tylko przy okazji operacji epileptycznych), dzięki którym, stymulując różne obszary układu limbicznego, mógł wpływać na emocje. Koncentrował się na agresji – w najbardziej znanym pokazie zatrzymał szarżującego na niego byka przez zdalną stymulację jądra ogoniastego. Jednak, pomimo wartościowych odkryć i ostrożnego podejścia do eksperymentów na ludziach, okres zimnej wojny nie sprzyjał publikowaniu artykułów o zdalnej kontroli mózgu i badania zostały zaniechane.

Hiszpański fizjolog José Manuel Delgado wszczepiał neurostymulatory w mózgi zwierząt, dzięki którym mógł wpływać na ich emocje. W najbardziej znanym pokazie zatrzymał szarżującego na niego byka (1966 r.).

Renesans przyniosło dopiero XXI stulecie. Przykładem są zdalnie sterowane szczury, ćwiczone przez Johna Chapina w Nowym Jorku. Wykorzystujemy tutaj znajomość dwóch obszarów mózgu szczura: tego, do którego docierają odczucia z wibrys, czyli wąsów, które szczur wykorzystuje w dużej mierze jako suplement wzroku, oraz układu nagrody (zwanego też ośrodkiem przyjemności), którego stymulacja jest mózgową kwintesencją przyjemności (również u ludzi – naturalnie aktywowany jest przy zaspokajaniu popędów, ale też przez uzależniające substancje psychoaktywne). I tak impuls dostarczony do mózgu szczura w odpowiedniej okolicy kory baryłkowatej daje wrażenie przypominające dotknięcie jednego z wąsów, po lewej lub prawej stronie. Jeśli w odpowiedzi na taki impuls szczur skręci w odpowiednią stronę, w nagrodę dostarczany jest impuls do ośrodka przyjemności. Przyjemność jest tak duża, że już po krótkim treningu szczury godzą się na ten rodzaj zdalnego sterowania, nosząc w plecaczku stymulator podłączony do implantowanych elektrod i radia. Wydawane komendy dotyczą tylko kierunku przemieszczania, a do tego, jak ominąć przeszkody, szczur używa już własnej inteligencji. Tak nagradzane szczury planuje się zatrudnić np. do odnajdywania min.

Nieinwazyjne interfejsy mózg-komputer

Opisywane powyżej wtyczki do mózgu nie stały się jeszcze tak popularne jak film „Matrix". Za to coraz popularniejsze staje się sterowanie komputerem za pomocą fal mózgowych odczytywanych z powierzchni głowy bez konieczności otwierania czaszki. Sygnał ten zwiemy elektroencefalogramem (EEG) – jest on niezmiernie złożony, bo zawiera w sobie jednoczesne ślady wszystkich biegnących w mózgu myśli i procesów. Pomimo tego, w ostatnich dziesięcioleciach nauczyliśmy się odczytywać z niego proste intencje, które można wykorzystać do sterowania, czyli przekazu informacji.

Najprostsze i najpopularniejsze współcześnie interfejsy mózg-komputer opierają się na znanym od dziesięcioleci odzwierciedleniu procesu selektywnej uwagi w zapisach czynności elektrycznej mózgu. Tak zwane potencjały wywołane to widoczne w EEG odpowiedzi mózgu na bodźce. Ale nie na wszystkie bodźce – tylko na te, na które zwracamy uwagę. Tak więc wystarczy przygotować odpowiednio spreparowane bodźce, na przykład mignięcia różnych literek, i odczytać z EEG, z którym mignięciem skorelowana jest widoczna w EEG odpowiedź (tak zwany potencjał P300). Będzie to oznaczało, że na to właśnie mignięcie (czyli tę konkretną literę) zwracamy uwagę. Miganie liter, na które nie zwracamy uwagi – czyli wszystkich poza tą, którą chcemy w danej chwili napisać – nie wywołuje odpowiedzi, co również widać w EEG. W ten sposób możemy, koncentrując uwagę na kolejnych literach, pisać bez pośrednictwa mięśni. Oczywiście mogą też migać inne ikonki, można tak sterować wózkiem inwalidzkim czy przełączać kanały telewizora. Brzmi to dość prosto, ale w rzeczywistości nie jest łatwo przed dłuższy czas koncentrować się na kolejnych literkach (pomaga w tym np. liczenie mignięć tej literki, o którą nam chodzi). Również „odczytanie" z EEG odpowiedzi nie jest łatwe i jednoznaczne, wymaga zwykle uśrednienia przynajmniej kilku odpowiedzi i trochę matematyki.

Możemy nie obawiać się ani tego, że ktoś odczyta nasze myśli, ani tego, że będzie bezpośrednio manipulował naszą wolą przez mózgowe implanty.

Drugie co do popularności podejście opiera się również na odpowiedzi na bodźce wzrokowe, tym razem tak zwane potencjały wzrokowe stanu ustalonego (SSVEP od ang. *steady state visual evoked potentials*). Działają podobnie do P300: jeśli patrzymy na światło migające 20 razy na sekundę, to w korze wzrokowej pojawiają się oscylacje o częstości dokładnie 20 Hz. Ale ciekawie robi się dopiero wtedy, gdy w polu naszego widzenia migają dwie lampy z różnymi częstościami. Pomimo że *patrzymy* na obie, w korze wzrokowej odtwarza się częstość, z którą miga ta lampa, o której w danej chwili *myślimy*. Skonstruowanie opartego na tym zjawisku BCI to już bułka z masłem – każda cyferka miga z inną częstością, my myślimy o tej, którą chcemy wybrać, a komputer odnajduje w zapisie EEG odpowiadającą jej częstość.

Opisane powyżej interfejsy działają, informacja jest faktycznie przekazywana z mózgu bez pośrednictwa mięśni. Dla osób sparaliżowanych to już bardzo dużo, ale mieliśmy nadzieję na coś w miarę bezpośrednio tłumaczącego myśli na rozkazy, a nie długotrwałe wślepianie się w migające symbole...

Najbliższe bezpośredniemu „odczytowi intencji" są interfejsy oparte na wykrywaniu w EEG sygnałów związanych z planowaniem ruchu – w tym również ruchu wyobrażonego, niekoniecznie wykonywanego. Ich opis wykracza poza ramy tego eseju, więc pozostaniemy przy krótkim podsumowaniu: BCI oparte na wyobrażeniach ruchu (ang. *motor imagery*, w żargonie czasem ERD/ERS od nazwy efektu obserwowanego w EEG) działają w sposób bardziej naturalny od opisanych powyżej P300 i SSVEP. Na przykład wyobrażenie ruchu prawą ręką możemy przypisać do komendy skrętu w prawo, a ruchu stopą – do przyspieszenia. Ale przed ich użyciem konieczne są często tygodnie treningu, duża ilość elektrod umieszczanych jednocześnie na głowie i skomplikowane algorytmy matematyczne.

Kontrola myśli?

Niedoskonałość komunikacji w obydwu kierunkach – do mózgu i z mózgu – wynika nie tyle z niedostatków aktualnego stanu wiedzy, co z podstawowych własności mózgu i filozoficznych granic poznania.

Każdy z nas jest inny, ukształtowany przez inne doświadczenia, i myśli inaczej. Więc jak mielibyśmy takie totalnie różne myśli klasyfikować i rozpoznawać? Zapach magdalenek może przywołać myśli o młodości, o straconym czasie lub tylko wywołać ślinotok – każda reakcja przebiega w mózgu w sposób niezmiernie złożony i w znacznej części inny u każdego człowieka. Dlatego możemy nie obawiać się ani tego, że ktoś odczyta nasze myśli, ani tego, że będzie bezpośrednio manipulował naszą wolą przez mózgowe implanty. A jednak drażnienie elektryczne odpowiednich okolic mózgu może dawać poczucie przyjemności podobne do narkotyków albo redukować poziom agresji. Z potencjałów wywołanych możemy czasami odczytać, na którym z bodźców koncentrowana jest uwaga...

Jak widać, odczytowi i kontroli poddają się tylko najprostsze odruchy i emocje. Wykształcona przez ewolucję złożoność mózgu i jego ciągła adaptacja umożliwiają nam dostosowanie do zmiennych warunków, ale są też skuteczną bronią przed jego dokładnym poznaniem.

Dzięki wybujałej ewolucji tego przerośniętego organu podporządkowujemy sobie przyrodę, tworzymy symfonie i obozy koncentracyjne, a postęp w pojmowaniu tajemnic Wszechświata wydaje się nie mieć granic. Za wyjątkiem tej jednej, czyli zrozumienia samego mózgu – wszak jest to po części pytanie o przyczynę i sens tego wszystkiego.

PIOTR DURKA

* Tłumaczenie autora z książki Miguela Nicolelisa „Boundaries: The New Neuroscience of Connecting Brains with Machines and How It Will Change Our Lives".

Prof. dr hab. Piotr Durka jest fizykiem, kierownikiem Zakładu Fizyki Biomedycznej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Autor m.in. książek „Internet. Komputer. Cyfrowa Rewolucja" oraz „Cyfrowy Świat: jak to działa".