



■ Ian Stewart
**PO CO NAM
MATEMATYKA**
Prószyński i S-ka

Liczby są wszędzie

MATEMATYKA to nie tylko suche wzory i nudne obliczenia. To także sposób myślenia, który pomaga nam rozwiązywać problemy i podejmować decyzje. Oraz źródło piękna i harmonii, które inspirują artystów i filozofów. Matematyczne algorytmy pomagają nam w określeniu najkrótszej trasy dotarcia do celu, co z kolei pozwala nam zaoszczędzić czas i pieniądze, a przedsiębiorstwom także zwiększa efektywność i produktywność. To dzięki matematyce na ekranach kin, telewizorów i komputerów podziwiać możemy wyimaginowane światy, które wyglądają realistycznie. Matematyka fizyczna i zniechęcane przez wielu równania różniczkowe pomagają bowiem w tworzeniu realistycznych efektów fizycznych, takich jak symulacja płynów, eksplozji, tkanin, wody, dymu czy ruchu przedmiotów. Matematyka ma jednak i ciemne strony. Wykorzystywana jest choćby przez polityków do manipulowania granicami okręgów wyborczych w celu uzyskania przewagi politycznej. Ian Stewart w ciekawy i humorystyczny sposób pokazuje w swojej książce, jak matematykę wykorzystuje się w bardzo odległych dziedzinach ludzkiej aktywności. To książka nie tylko o świecie liczb – także o świecie, w którym liczby i wzory leżą u podłoża cywilizacji. Oraz opowieść o ludziach, którzy odkrywali tajemnice matematyki i tworzyli jej narzędzia. Po jej lekturze łatwo odpowiedzieć na tytułowe pytanie, które wielu z nas zadawało sobie w szkole.

© KK

Najtrudniejszy projekt świata

MATEUSZ HOHOL

Katrin Amunts, dyrektorka naukowa Human Brain Project, szuka Świętego Graala nauki. Chce dokładnie zmapować ludzki mózg i stworzyć jego cyfrową kopię.

Pierwsze badania neuroanatomiczne przeprowadzane *post mortem* przez medyków aleksandryjskich w III w. p.n.e. doprowadziły do opisanego struktur takich jak mózdzek, opony czy komory.

Trzeba było jednak całych tysięcy ludzi, by odkryć komórkową budowę mózgu, zrozumieć, z czego składają się neurony i jak komórki te komunikują się ze sobą, tworząc połączenia między różnymi obszarami. Z pogłębieniem rozumienia anatomii mózgu w różnych skalach przestrzennych szło w parze mozolne odcyfrowywanie jego funkcji, a w konsekwencji podjęcie odwiecznego pytania o genezę naszych myśli i emocji w naukowy sposób.

Wszystko to nie byłoby możliwe bez tworzenia coraz to nowych metod i narzędzi badawczych, począwszy od mikroskopu i technik barwienia preparatów, przez techniki nagrywania sygnałów z pojedynczych neuronów, elektroencefalografię (rejestrwanie tzw. fal mózgowych, czyli zmian elektrycznych na powierzchni skóry, związanych z pracą mózgu), a w ostatnich dekadach optogenetykę (modyfikacje genetyczne pozwalające na manipulowanie aktywnością mózgu za pomocą światła) czy obrazowanie struktury i funkcji mózgu za pomocą rezonansu magnetycznego.

A jednak Katrin Amunts i jej współpracownicy rozpoczynają swój artykuł opublikowany w zeszłym roku na łamach czasopisma „eNeuro” od stwierdzenia, że „rozumienie ludzkiego mózgu jest wciąż wielkim wyzwaniem badawczym XXI wieku”.

Co jest wyzwaniem

Rzecz nie tylko w tym, że na mapie rozumienia mózgu wciąż znajdują się plamy naszej ignorancji. Wiemy już wiele o tym, jak mózg zbudowany jest w różnych skalach przestrzennych – począwszy od cząsteczek mierzonych w nanometrach, przez neurony mierzące milimetry, aż po całe obwody obejmujące centymetry tkanki – i co robi w różnych skalach czasowych. Od procesów zajmujących ułamek sekundy, takich jak zmiany w układzie przestrzennym cząsteczek, aż po te dziejące się na przestrzeni życia, jak tworzenie i obumieranie neuronów, związane ze starzeniem się organizmu.

Problem polega jednak na tym, że poszczególne porcje naszej wiedzy, dotyczące każdej z tych skal, często pozostają niezintegrowane, a związki przyczynowe między procesami zachodzącymi w tych skalach jeszcze nieodkryte. Jak piszą Amunts i jej współpracownicy, „wciąż sporym wyzwaniem jest zrozumienie (...), w jaki konkretnie sposób wiązanie neuroprzekaznika z jego receptorem moduluje aktywność zespołów komórek oraz wielkoskalowych sieci obejmujących długodystansowe szlaki włókien i obszary mózgu, z których ostatecznie wyłania się zachowanie. Inne pytania dotyczą tego, jakie reguły rządzą leżącymi u ich podstaw sieciami i jak to możliwe, że są one tak skuteczne i tak efektywne, a mimo to zużywają tak mało energii”.

To jednak nie wszystko. Wiemy dziś nie tylko to, że mylili się tzw. frenologowie, postulujący na przełomie XVIII i XIX w. istnienie pojedynczych ośrodków mózgowych odpowiedzialnych



za konkretne zdolności poznawcze i cechy charakteru (np. stanowczość, inteligencję i wytrwałość) – w rzeczywistości wylaniają się one ze współpracy skomplikowanych sieci mózgowych. Zdaliśmy sobie również sprawę z tego, że nie jest wcale tak, iż to, co mniejsze i szybsze w mózgu, jest zawsze prostą przyczyną tego, co większe i trwające dłużej. Bo mózg to naprawdę skomplikowana maszyna.

Brak dogłębnego zrozumienia jego złożoności utrudnia nie tylko dalsze postępy teoretyczne na drodze do rozwiązania frapujących zagadek – np. czym jest świadomość? – ale też przekładanie wiedzy neuronaukowej na sztukę medycyny. To ostatnie hamuje z kolei przełomy w zapobieganiu i leczeniu chorób mózgu, przede wszystkim psychicznych i neurodegeneracyjnych.

Wyjaśnij się sam

Zdaniem Amunts podjęcie wyzwania zrozumienia ludzkiego mózgu możliwe jest dziś dzięki komputerom, umożliwiającym tworzenie cyfrowych modeli mózgu i testowanie hipotez badawczych na drodze symulacji. Coraz większe znaczenie mają również nowe narzędzia analizy danych przeprowadzane przy wykorzystaniu uczenia maszynowego i narzędzi opartych na sztucznych sieciach neuronowych, które zresztą inspirowane są podstawowymi zasadami, wedle których działa mózg. Zatoczyliśmy więc koło – zrozumieliśmy mózg na tyle, by stworzyć oparte na tej wiedzy narzędzia umożliwiające dalszą jego ekspolorację.

Rzecz jasna komputer od dekad jest podstawowym narzędziem pracy niemal każdego naukowca, także zajmującego się mózgiem i poznaniem, i to niemal na każdym etapie procesu badawczego. Typowy laptop czy komputer stacjonarny nie zda się jednak na wiele w mierzeniu się z problemem złożoności mózgu. Cyfrowy trójwymiarowy model mózgu gryzonia sporządzony z rozdzielczością przestrzenną rzędu 1 mikrometra (1 milimetr to 1000 mikrometrów) zajmuje około 8 terabajtów. Dla porównania: komputer, na którym piśzę ten tekst, posiada 256 gigabajtów przestrzeni dyskowej. Jest to ponad 30 razy za mało, by pomieścić taki model. Analogiczny model ludzkiego mózgu zająłby już petabajty, →

MITCHEL DYAKOWSKI

⇒ czyli miliony gigabajtów. Pomyślmy teraz, że mózgi poszczególnych osób różnią się między sobą, co oznacza, że aby uzyskać wiarygodne rezultaty, trzeba ze sobą porównać wiele mózgów.

Na dodatek tak ogromne modele trzeba nie tylko przechowywać, ale także efektywnie na nich operować. Konieczność operowania ogromnymi zbiorami różnorodnych danych zgromadzonych w licznych badaniach przez duże, współpracujące ze sobą zespoły badawcze przekracza nawet możliwości pojedynczych superkomputerów. Sytuacja ta dotyczy zresztą nie tylko neuronauki, ale również np. badań nad klimatem. W świetle tych wyzwań kierowany obecnie przez Katrin Amunts Human Brain Project, rozpoczęty w 2013 r. projekt flagowy UE, opracował platformę badawczą o nazwie EBRAINS, będącą połączeniem rozproszonej infrastruktury sprzętowej oraz narzędzi wspomagających badaczy na różnych etapach procesu badawczego. W artykule „The Coming Decade of Digital Brain Research” („Nadchodząca dekada cyfrowych badań nad mózgiem”), mającym charakter manifestu programowego Human Brain Project, Amunts i współpracownicy piszą, że „EBRAINS jest oparta na współpracy platformą badawczą, której celem jest przeniesienie badań nad mózgiem na wyższy poziom oraz dalszy rozwój zastosowań w medycynie i technologiach inspirowanych przez mózg”. Jednym z osiągnięć infrastruktury EBRAINS jest możliwość tworzenia „cyfrowych bliźniaków”.

Twój cyfrowy bliźniak

Ogromna część naszej wiedzy o funkcjonowaniu mózgu pochodzi z badań nad pacjentami, którzy doznali uszkodzeń mózgu (lezji). Jeśli np. w wyniku udaru czy mechanicznego urazu jakaś część mózgu przestanie pracować, co doprowadzi u pacjenta do utraty jakiejś funkcji poznawczej, to oznacza, że u osoby zdrowej ta struktura zaangażowana jest w tę konkretną funkcję.

Przykładowo, badając pacjentów z uszkodzeniami tzw. tylnej części zakrętu czołowego dolnego, którzy stracili zdolność mówienia, XIX-wieczny chirurg i antropolog Paul Broca doszedł do wniosku, że struktura ta jest „ośrodkiem mowy”. Z oczywistych względów nie jest możliwe wykonywanie eksperymentów

Cyfrowe symulacje otwierają nową erę badań mózgu.

Pozwalają sprawdzać skutki zmian, których z racji etycznych lub praktycznych nie można wykonywać w doświadczeniach z udziałem ludzi.

polegających na celowym wykonywaniu takich uszkodzeń. Dziś, dzięki technice określanej jako przezczaszkowa stymulacja magnetyczna, możliwe jest jednak wywoływanie „wirtualnych lezji”, polegających na przejściowym i bezpiecznym dla osoby badanej tłumieniu aktywności struktury mózgowej.

Jak twierdzą badacze zaangażowani w Human Brain Project, symulacje mózgu umożliwiają coś podobnego: pozwalają sprawdzać skutki zmian, których z racji etycznych lub praktycznych nie można wykonywać w doświadczeniach z udziałem ludzi. Mając do dyspozycji symulację działania mózgu oraz skany mózgu pacjenta wykonane metodą rezonansu magnetycznego lub za pomocą elektroencefalografii, możliwe jest „spersonalizowanie” modelu i eksperymentowanie na nim zgodnie z przyjętymi hipotezami albo wręcz metodą prób i błędów. W ten sposób współpracownik Katrin Amunts Viktor Jirsa stworzył w 2017 r. na podstawie danych neuroobrazowych symulację pacjenta z epilepsją, pozwalającą na planowanie leczenia i przewidywanie jego skutków.

Co więcej, możliwe jest tworzenie całych „wirtualnych populacji pacjentów” z uszkodzeniami mózgu lub schorzeniami neurologicznymi, co jest szczególnie istotne w przypadku chorób rzadkich. Według Amunts i współpracowników „tego typu spersonalizowane wirtualne mózgi mogą być postrzegane jako krok w kierunku czegoś jeszcze bardziej teoretycznego i technicznie wymagającego, ale także lepiej dostosowanego do ciągłej

zmieniającej się natury aktywności mózgu we wszystkich skalach czasowych. Konsekwencje spersonalizowanej symulacji mózgu widzimy w modelu, który jest nieustannie informowany i aktualizowany przez dane z prawdziwego świata, dlatego też model ten określić można jako cyfrowego bliźniaka”.

Zauważają oni również, że „np. głęboka stymulacja mózgu i ogólnie neurochirurgia odniosłyby ogromne korzyści ze spersonalizowanych bliźniaków, które mogłyby pomóc w planowaniu zabiegu w taki sposób, aby zapewnić maksymalną ochronę i zachowanie zdrowych tkanek. W szczególności mogłyby to informować chirurgów o konieczności uaktualnienia modelu na podstawie sygnałów z mózgu wykrywanych przez czujniki podczas operacji”.

Katrin Amunts wraz ze współpracownikami z Human Brain Project twierdzą, że tworzenie „cyfrowych bliźniaków” okaże się przydatne nie tylko w medycynie i badaniach podstawowych, ale również w obszarze tworzenia nowych, inspirowanych neuronauką technologii. Te ostatnie obejmują tworzenie realistycznej biologicznie i spersonalizowanej sztucznej inteligencji.

Pełzająca rewolucja

Kierowana przez Katrin Amunts śmiała inicjatywa Human Brain Project, której głównym celem jest tworzenie cyfrowego odwzorowania ludzkiego mózgu, była przedmiotem krytyki w środowisku neuronaukowym. Jednym z zarzutów kierowanych w stronę projektu było niedoszacowanie tematyki badań nad poznaniem i zachowaniem. W odpowiedzi na ten zarzut w ostatniej fazie projektu, kończącej się we wrześniu 2023 r., zdecydowano się położyć nacisk na tematykę świadomości i sztucznych sieci neuronowych. Ponadto, jak w jednym z artykułów podaje zespół Katrin Amunts, w ramach projektu eksplorowane są tematy tak szerokie, jak „mechanizmy uczenia się, kontrola wzrokowo-motoryczna, sen, orientacja przestrzenna, kodowanie predykcyjne i percepcja”. Niedługo będziemy w stanie przekonać się więc, na ile neuroinformatyka, a szczególnie infrastruktura EBRAINS, zrewolucjonizowała rozumienie naszego wewnętrznego kosmosu.