

STANISŁAS
DEHAENE

JAK SIĘ
UCZYMY?

Dlaczego mózgi uczą się
lepiej niż komputery... jak dotąd

Tłumaczenie: Dariusz Rossowski

SIEDEM DEFINICJI UCZENIA SIĘ

Co znaczy „uczyć się”? Moja pierwsza i najogólniejsza definicja brzmi następująco: uczyć się to tworzyć wewnętrzny model świata zewnętrznego.

Możesz nie zdawać sobie z tego sprawy, ale twój mózg przyśwoił tysiące modeli zewnętrznego świata. Mówiąc w przenośni, są one jak miniaturowe makiety, mniej lub bardziej wierne oddające reprezentowaną rzeczywistość. Wszyscy mamy w mózgu na przykład mentalną mapę swojego osiedla i swojego domu – wystarczy zamknąć oczy, a możemy sobie wyobrazić te miejsca. Naturalnie nikt z nas nie urodził się z tą mentalną mapą. Musieliśmy pozyskać ją wskutek nauki.

Bogactwo tych mentalnych modeli, w większości nieświadomych, przekracza wszelkie wyobrażenie. Tak na przykład dysponujesz rozległym mentalnym modelem języka ojczystego, który pozwala ci rozumieć czytane w tej chwili słowa oraz domyślać się, że *poliewoj* nie jest polskim wyrazem, podczas gdy *omdlewać* i *rzewny* są, a *smoczystan* mógłby być. W twoim mózgu mieszczą się ponadto liczne modele twojego ciała; mózg nieustannie korzysta z nich, by mapować pozycje twoich kończyn oraz kierować ich ruchem z jednoczesnym zachowywaniem równowagi całego ciała. W innych mentalnych modelach zakodowana jest wiedza o różnych przedmiotach i interakcjach z nimi – umiejętność trzymania ołówka, pisania czy jeżdżenia na rowerze. Jeszcze inne reprezentują umysły ludzi – dysponujesz bogatym mentalnym katalogiem osób ze swojego otoczenia, ich wyglądu, głosu, upodobań, dziwactw.

Te mentalne modele pozwalają generować nader realistyczne symulacje otaczającego nas świata. Czy zauważyłeś, że twój mózg zapewnia ci od czasu do czasu najautentyczniejsze pokazy rzeczywistości wirtualnej, w której możesz chodzić, przemieszczać się, tańczyć, zwiedzać nowe miejsca, prowadzić błyskotliwe rozmowy, odczuwać silne emocje? Takie są twoje sny! Fascynującą sprawą jest uświadomienie sobie, że wszystkie koncepcje przychodzące do nas w snach, choćby najbardziej złożone, są po prostu wytworem puszczenia na żywioł naszych wewnętrznych modeli świata.

Jednakże również w stanie czuwania „śnimy” sobie rzeczywistość: mózg nieustannie nakłada hipotezy i ramy interpretacyjne na zewnętrzny świat. Dzieje się tak dlatego, że choć nie zdajemy sobie z tego sprawy, każdy obraz pojawiający się na siatkówce oka jest wieloznaczny. Ilekroć widzimy na przykład talerz, odbierany obraz może pasować do nieskończenie wielu elips. Jeżeli postrzegamy talerz jako kolisty, mimo że zgodnie z nieprzetworzonymi danymi zmysłowymi jest owalny, wynika to z tego, iż mózg dostarcza dodatkowych danych – nauczył się, że najprawdopodobniejszą interpretacją tego obrazu jest kształt kolisty. W ciszy zakulisowej pracy obszary zmysłowe mózgu niezmiernie wyliczają prawdopodobieństwa i tylko ten model, który odznacza się najwyższym prawdopodobieństwem, dociera do naszej świadomości. To właśnie projekcje mózgu w ostatecznym rozrachunku nadają sens strumieniowi danych, który trafia do nas za pośrednictwem zmysłów. W razie braku wewnętrznych modeli surowe dane wejściowe ze zmysłów nic by nie znaczyły.

Poznawanie czegoś nowego pozwala mózgowi uchwycić fragment rzeczywistości, który poprzednio mu umknął, i wykorzystać go do skonstruowania nowego modelu świata. Może to być część rzeczywistości zewnętrznej, jak wtedy gdy uczymy się historii, botaniki lub układu ulic w mieście, ale mózg uczy się również mapować rzeczywistość wewnętrzną naszego ciała, jak wtedy gdy uczymy się koordynować ruchy

i skupiać myśli, aby grać na skrzypcach. W obu przypadkach mózg *i n t e r n a l i z u j e* nowy aspekt rzeczywistości – dostosowuje swoje obwody do przyswojenia sobie czegoś, czego jeszcze nie opanował.

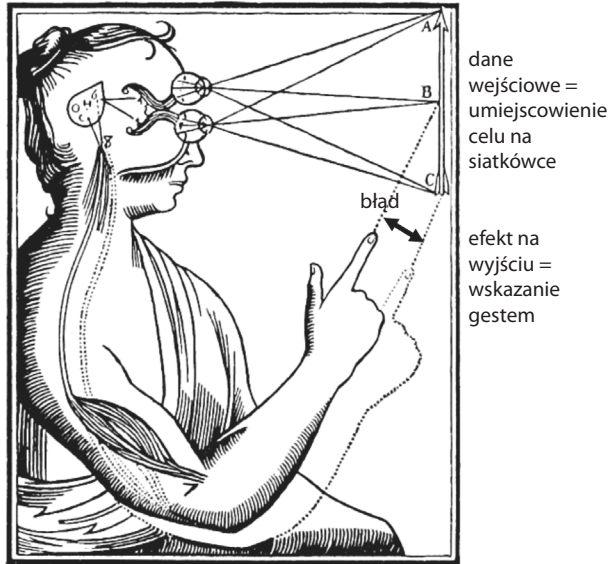
Takie dostosowania muszą być oczywiście dokonywane inteligentnie. Siła uczenia się leży w zdolności do adaptowania się do zewnętrznego świata i korygowania błędów – skąd jednak mózg uczącego się „wie”, jak aktualizować bieżący model, gdy na przykład gubi się na osiedlu, spada z roweru, przegrywa partię szachów czy popełnia błąd ortograficzny w słowie „espresso”? Przyjrzymy się siedmiu kluczowym ideom, które należą do sedna dzisiejszych algorytmów *machine learningu*, a które równie dobrze mogą stosować się do naszego mózgu – siedmiu różnym definicjom tego, co znaczy „uczyć się”.

UCZENIE SIĘ TO REGULOWANIE PARAMETRÓW MENTALNEGO MODELU

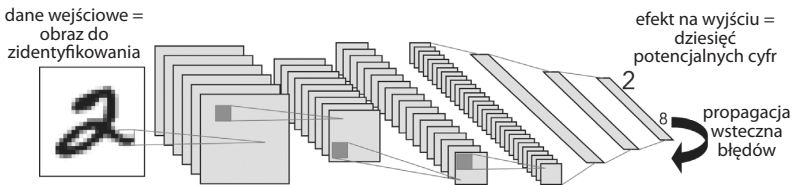
Wyregulowanie mentalnego modelu niekiedy bywa sprawą bardzo prostą. W jaki sposób na przykład sięgamy po widziany przez siebie przedmiot? Już w XVII wieku Kartezjusz (1596–1650) odgadł, że nasz układ nerwowy musi zawierać pętle przetwarzania, które transformują wejściowe dane wzrokowe w polecenia dla mięśni (zob. rysunek na s. 36). Możesz doświadczyć tego osobiście: spróbuj chwycić jakiś przedmiot, mając na nosie cudze okulary, najlepiej osoby bardzo krótkowzrocznej. A jeszcze lepiej zdobądź okulary pryzmatyczne przesuwające obraz o kilkanaście stopni w lewo i patrząc przez nie, spróbuj wziąć coś do ręki¹. Okaze się, że twoja pierwsza próba będzie całkowicie chybiona; z powodu użycia pryzmatu wyciągniesz

¹ Możesz wykonać ten eksperyment na wystawie C3RV34U, którą zorganizowaliśmy w Cité des Sciences, głównym muzeum nauki w Paryżu.

Regulacja pojedynczego parametru – przesunięcia wzrok–działanie



Regulacja milionów parametrów – połączenia odpowiedzialne za widzenie



Czym jest uczenie się? Uczyć się to odpowiednio nastawiać parametry wewnętrznego modelu. Na przykład aby nauczyć się wskazywać coś palcem, trzeba określać wielkość przesunięcia pomiędzy danymi wzrokowymi a efektami ruchu: każdy błąd celowania palcem dostarcza użytecznych informacji, które pozwalają zmniejszyć tę różnicę. Choć w sztucznych sieciach neuronowych liczba ustawień jest znacznie większa, zasada pozostaje taka sama. Rozpoznanie cyfry wymaga precyzyjnego dostrojenia milionów łączy. Również w tym wypadku każdy błąd (na rysunku: nieprawidłowe „8” na wyjściu) może zostać „wycofany” na zasadzie propagacji wstecznej i wykorzystany do regulacji wartości połączeń, co polepszy działanie w następnej próbie.

rękę na prawo od przedmiotu, w który celujesz. Stopniowo będziesz przekierowywał rękę coraz bardziej w lewo. Na zasadzie kolejnych prób i błędów twoje ruchy będą coraz precyzyjniejsze, w miarę jak mózg będzie uczył się korygować przesunięcie wzrokowe. A teraz zdejmij okulary i weź przedmiot do ręki – z zaskoczeniem przekonasz się, że twoja ręka podąża w niewłaściwe miejsce, tym razem za daleko w lewo!

Co się stało? W trakcie tego krótkiego okresu nauki twój mózg dostosował wewnętrzny model wzroku. Jeden z parametrów tego modelu, ten, który odpowiada przesunięciu między widzianą sceną a pozycją części ciała, został nastawiony na nową wartość. To, co twój mózg zrobił w trakcie tej rekalkibracji metodą prób i błędów, można porównać do tego, jak myśliwy ustawia celownik strzelby: wykonuje strzał próbny i korzysta z niego do kalibracji wizjera, oddając stopniowo coraz celniejsze strzały. Nauka tym sposobem może przebiegać bardzo szybko; wystarcza kilka prób, aby skorygować różnicę między wskazaniem wzrokowym a skutkiem działania. Jednak nowe ustawienie parametru nie jest zbieżne ze starym – dlatego powstaje systematyczny błąd, jaki popełniamy po odstawieniu pryzmatu i powrocie do normalnego patrzenia.

Oczywiście uczenie się tego typu jest dość szczególne, gdyż wymaga dostosowania tylko jednego parametru (kąta patrzenia). Z reguły uczenie się jest rozleglejsze i pociąga za sobą regulację dziesiątków, setek czy nawet tysięcy milionów parametrów (każdej synapsy w odpowiednim obwodzie mózgowym). Zawsze odbywa się to jednak na tej samej zasadzie; wszystko sprowadza się do wyszukiwania takich wartości wśród mrowia potencjalnych ustawień modelu wewnętrznego, które będą się najlepiej zgadzać ze stanem świata zewnętrznego.

W Tokio rodzi się dziecko. W ciągu najbliższych dwóch, trzech lat jego wewnętrzny model językowy będzie musiał się dostosować do cech języka japońskiego. Mózg tego malucha można porównać do komputera z milionami ustawień

na poszczególnych poziomach. Niektóre z nich, na poziomie słuchowym, określają, jaki zestaw spółgłosek i samogłosek jest stosowany w japońskim i według jakich reguł się je łączy. Dziecko urodzone w japońskiej rodzinie musi odkryć, jakie fonemy składają się na japońskie słowa oraz gdzie umieszczać granice pomiędzy tymi dźwiękami. Jeden z takich parametrów dotyczy rozróżnienia dźwięków /R/ i /L/ – występuje między nimi znaczący kontrast w angielskim czy polskim, ale nie w japońskim, w którym nie ma różnicy między elekcją Billa Clintona a erekcją Billa Clintona... Każde niemowlę musi więc ustalić zbiór parametrów określających łącznie, które kategorie dźwięków mowy mają istotne znaczenie w jego języku ojczystym.

Podobny proces uczenia się jest powtarzany na każdym poziomie – od wzorców dźwiękowych do słownictwa, gramatyki i semantyki. Mózg został zorganizowany w hierarchię modeli rzeczywistości. Każdy z nich jest zagnieżdżony w poprzednim jak matryoszki, a uczenie się polega na korzystaniu z napływających danych, by regulować parametry na każdym poziomie tej hierarchii. Przyjrzyjmy się przykładowi wysokopoziomowemu: przyswajaniu reguł gramatycznych. Inna kluczowa różnica między japońskim i angielskim dotyczy szyku słów w zdaniu. We wzorcowym zdaniu z podmiotem, orzeczeniem i dopełnieniem bliższym w języku angielskim stawia się najpierw podmiot, potem orzeczenie, a na końcu dopełnienie: „Janek + je + jabłko”. Tymczasem po japońsku najczęściej występuje szyk: podmiot, potem dopełnienie, potem orzeczenie, czyli „Janek + jabłko + je”. Co ciekawe, szyk jest odwrócony również w przypadku przyimków (które logicznie stają się po-imekami), form dzierżawczych i wielu innych części mowy. W konsekwencji zdanie „Mój wujek chce pracować w Tokio” zmienia się w bełkot godzien Mistrza Yody z *Gwiezdnych wojen*: „Wujek mój Tokio w pracować chce” – brzmi to jednak całkowicie sensownie dla osoby japońskojęzycznej.