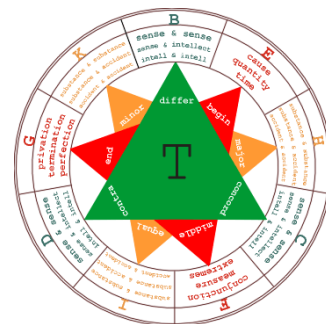


55 lat sztucznej inteligencji

Na długo przed powstaniem komputerów, w połowie XIII wieku Ramon Lull, kataloński franciszkanin, filozof i teolog, pisał w traktacie „O rzeczach wielkich, ogólnych i ostatecznych” (*Ars magna generalis et ultimata*) o dowodzeniu prawd za pomocą ruchomych diagramów. 600 lat później powstał niezwykle ambitny projekt budowy „maszyny analitycznej” Charlesa Babbage, pierwszego urządzenia programowalnego za pomocą kart perforowanych, które miało być napędzane ... energią pary! Liczącego parowozu nigdy w pełni nie zbudowano, ale sto lat później, gdy zaczęły powstawać pierwsze komputery, mechanizacja wnioskowania wydała się w zasięgu ręki. Wiedzano już, że mózg składa się z neuronów zliczających impulsy, powstały modele matematyczne sieci wykorzystujących inspirowane przez neurony elementy logiki progowej (Walter Pitts, Warren McCulloch), istniała cybernetyka (Norbert Wiener), nauka zajmująca się sterowaniem, mechanizmami kontroli zachowania i przepływu informacji u zwierząt i maszyn, budowano pierwsze roboty oparte na elektronicznych obwodach ze sprzężeniem zwrotnym. Rozwijała się teoria informacji (Claude Shannon) i teoria obliczeń (Alan Turing), a pierwsze komputery powszechnie nazywano „elektronicznymi mózгами”. Na konferencji w 1956 roku, zanim ukuto termin „informatyka”, powstała nowa dziedzina nauki, której celem była sztuczna inteligencja (ang. Artificial Intelligence, zwykle skracane do AI).



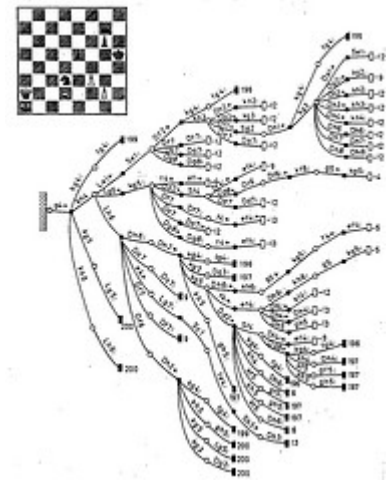
Początkowo AI robiła szybkie postępy, wydawało się, że budowa inteligentnych maszyn będzie możliwa w ciągu jednego pokolenia. Alan Turing był jednym z bardziej ostrożnych wizjonerów, pisząc w 1950 roku, że w ciągu następnych 50 lat maszyna zda test polegający na zdalnym prowadzeniu dialogu z ludźmi, którzy nie odróżnią jej od człowieka. Większość ekspertów sądziła, że będzie to możliwe znacznie szybciej. Allen Newell i Herbert Simon zademonstrowali w 1955 roku program „Teoretyka



Logiki”, który udowodnił na bardzo prymitywnym komputerze 38 z 52 twierdzeń logicznych z fundamentalnego dzieła Alfreda Whiteheada i Bertranda Russella „Principia Mathematica”, dotyczącego podstaw matematyki, znajdując przy tym bardziej elegancki dowód jednego z twierdzeń. Newell i Simon postawili sobie jako cel stworzenie „Ogólnego Rozwiązywacza Problemów” (General Problem Solver), próbując przy okazji pokazać, na czym polega ludzka inteligencja.

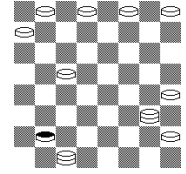


Podstawową trudność stojąca przed sztuczną inteligencją można łatwo zilustrować na podstawie gier planszowych. W środkowej partii szachów średnio można wykonać 35 różnych posunięć – które z nich wybrać? Jeśli chcemy przewidzieć skutki na 10 ruchów naprzód, co nie wystarczy do pokonania arcymistrza, to wszystkich możliwości mamy już prawie 3 miliony miliardów (3×10^{15}). Z powodu eksplozji kombinatorycznej żaden komputer nie zdoła ich wszystkich rozważyć, w dostępnym na ruch czasie można zbadać znacznie mniejszą liczbę kombinacji. Trzeba więc dysponować wiedzą, która pozwoli na wybór najlepszych rozwiązań. Podobny problem występuje nie tylko w grach, ale we wszystkich przypadkach wymagających rozumowania. Jaki ułożyć plan w szkole tak, by wszystkim pasowały godziny? Jak znaleźć najbardziej dogodne połączenie, jeśli jest wiele przesiadek? Jak rozmieścić 100 milionów struktur mikroprocesora, by działał jak najlepiej? Słowa mają wiele znaczeń i skojarzeń, które z nich wybrać by zrozumieć sens pytania i dać dobrą odpowiedź? Inteligentna maszyna powinna dysponować szeroką wiedzą podpowiadającą, co warto próbować – wiedzą niedoskonałą, ale pomocną w odkryciu, czyli **wiedzą heurystyczną** (gr. *heurisko* oznacza „znajduję”).



Procesy szukania rozwiązań przy wykorzystaniu wiedzy heurystycznej stały się podstawą badań nad sztuczną inteligencją. AI jako dziedzina nauki zajmuje się rozwiązywaniem problemów, dla których nie ma efektywnych algorytmów, gwarantujących znalezienie dobrych rozwiązań. Analiza sygnału mowy, analiza obrazu, sterowanie robotami, planowanie, rozumienie języka czy tłumaczenie maszynowe, gry planszowe i gry komputerowe, to typowe zagadnienia stojące przed sztuczną inteligencją. Ukoronowaniem

tej linii rozwoju stały się programy zdolne do pokonania mistrzów świata w wielu grach planszowych: w 1995 program Chinook wygrał w warcaby z Marionem Tinsleyem (wersja z 2007 roku nie może przegrać partii, może co najwyżej zremisować), program Logistello zwyciężył w trik-traka mistrza



świata Takeshi Murakami 6 do 0, a w 1997 roku program Deep Blue wygrał w szachy z Gary Kasparowem. Szachiści nie mogli w to uwierzyć bo moc obliczeniowa Deep Blue sięgała zaledwie poziomu 1/10.000 ludzkiego mózgu pokazując, że oprócz szybkości ważne są heurystyczne reguły i wiedza szachowa. Tylko 4 osoby w historii miały ponad 2800 punktów Elo, Kasaprov osiągnął 2851, a najlepsze obecnie programy Rybka i Houdini osiągają 3300 punktów, przekraczając o kilka klas ludzkie możliwości.



Dość szybko okazało się, że sam sposób reprezentacji wiedzy sprawia wielkie trudności. Jak opisać obraz, w którym maszyna widzi tylko kolorowe punkty, a człowiek widzi twarze i rozumie sens działań znajdujących się na obrazie ludzi? Jak opisać wiedzę eksperta za pomocą symboli przechowywanych w pamięci komputera? Reprezentacja wiedzy stała się jednym z głównym nurtów badań w ramach sztucznej inteligencji, stąd w zastosowaniach termin „inżynieria wiedzy” (*knowledge engineering*) pojawia się wymiennie z określeniem „sztuczna inteligencja”.

Początkowo w projektach sztucznej inteligencji skupiono się głównie na rozumowaniu na poziomie symbolicznym, a siłą napędową całej dziedziny stało się tworzenie systemów ekspertowych, które miały współpracować a w niektórych przypadkach całkiem zastąpić człowieka. Już w latach 1980 powstały systemy medyczne, doradzające w diagnostyce chorób bakteryjnych (MYCIN), chorób płuc (Puff, CENTAUR), narządów wewnętrznych (INTERNIST, CADUCEUS). Porównanie porad systemu MYCIN i 5 specjalistów z kliniki Uniwersytetu Stanford wykazały jego przewagę (52 punkty) nad specjalistami (34 - 50 punktów) i wyraźną przewagę nad studentem medycyny (24 punkty). Początkowo infrastruktura informatyczna była zbyt uboga by stosować takie systemy w praktyce szpitalnej, jednak rzeczywistą barierą przed ich rozpowszechnieniem stały się kwestie prawne oraz brak wyszkolonych lekarzy, którzy potrafiliby wykorzystać takie programy.



Pomimo tego lista systemów ekspertowych rutynowo stosowanych w praktyce medycznej jest długa i obejmuje systemy interwencyjne dla przypadków nagłych, pacjentów wymagających intensywnej opieki medycznej, systemy monitorujące aparaturę podtrzymującą procesy życiowe, analitykę laboratoryjną, wspomaganie diagnoz, analiz obrazów medycznych, systemy edukacyjne i wiele innych.

Systemy ekspertowe znalazły szerokie zastosowanie w chemii pomagając analizować struktury skomplikowanych związków, budowę białek, planując syntezę związków chemicznych. Bardzo skomplikowane systemy tworzono z myślą o biologii molekularnej, procesach zachodzących w komórkach, związkach pomiędzy genami, białkami, strukturami komórek i ich funkcją w organizmie. Najprostsze bakterie, np. pałeczka okrężnicy (*Escherichia Coli*), mają bardzo skomplikowany metabolizm, którego jeden człowiek nie potrafi ogarnąć. Na początku 2011 roku w systemie EcoCyc (ecocyc.org), który jest swojego rodzaju interakcyjną encyklopedią *E. Coli*, operującą wiedzą zebraną z ponad 20 tysięcy publikacji, było 1800 reakcji katalizowanych przez 1450 enzymów, 4489 genów, 5345 oddziaływań regulujących aktywność procesów. W ten sposób opisano już ponad 1000 mikroorganizmów (biocyc.org). Ludzkie komórki są nieporównywalnie bardziej skomplikowane i dużo gorzej opisane. Takie bazy danych nie dają się ogarnąć w szczegółach ludzkim rozumem.



Najszerzej znane są matematyczne systemy algebry symbolicznej, czyli systemy rozwiązujące zadania matematyczne nie w sposób numeryczny, ale przez przekształcanie równań, wiedzę matematyczną, która znacznie wykracza poza umiejętności studentów. Również inteligentne wspomaganie nauczania doczekało się systemów ekspertowych, z których najbardziej znane produkowane są przez firmę Carnegie Learning i szeroko wykorzystywane w nauczaniu matematyki w wielu szkołach w USA.



Japoński projekt budowy komputerów 5 generacji, realizowany w latach 1982-94 miał na celu stworzenie systemów przetwarzających wiedzę, „centralnego narzędzia we wszystkich dziedzinach społecznej działalności, włączając w to ekonomię, przemysł, kulturę i życie codzienne”. Projekt, na który wydano ponad miliard dolarów, opierał się na logicznej reprezentacji wiedzy, sprowadzając przetwarzanie wiedzy do manipulacji formułami

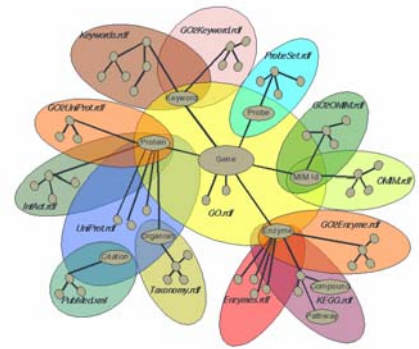
logicznymi i do budowy systemów komputerowych przeprowadzających setki milionów prostych „wnioskowań na sekundę”. Systemy ekspertowe miały używać dziesiątek tysięcy reguł, zawierających różnorodną wiedzę. Chociaż na konferencji zamykającej ten projekt w 1994 roku wstydliwie przemilczano pierwotne ambitne cele - tłumaczenie maszynowe z japońskiego na angielski z dokładnością 90%, rozumienie ciągłej mowy z dokładnością 95% i dialog z maszyną w języku naturalnym – to częściowo zrealizowano je później, używając innych metod reprezentacji wiedzy, algorytmów analizy tekstu i analizy sygnałów.



W USA, zapewne pod wpływem japońskich planów, w 1984 roku też rozpoczęto projekt AI na wielką skalę. Douglas Lenat był inicjatorem i nadal kieruje projektem o wdzięcznej nazwie CYC (wymawiany jako „sajk”, fragment słowa enCYClopedia), którego celem jest wyposażyć komputery w „zdrowy rozsądek”. Dzięki temu maszyny powinny rozumieć wiele skojarzeń i powiązań wymagających wiedzy encyklopedycznej. Lenat zauważył, że zwykle jeśli coś wiemy, potrafimy odpowiedzieć natychmiast, a jeśli nie wiemy i zaczynamy prowadzić dłuższe rozważania to często dochodzimy do błędnych wniosków. Bardzo obszerna wiedza może więc zastąpić długie rozumowanie, ale jej zgromadzenie wymaga uporządkowania pojęć pozwalających opisać rzeczy i zdarzenia. Zaczęto więc tworzyć opisy najbardziej ogólnych pojęć podstawowych, dotyczących czasu, przestrzeni, substancji, rzeczy namacalnych i nienamacalnych, pojęć opisujących rzeczywistość wspólnych dla wszystkich ludzi (*human concensus reality*). Każde z tych pojęć opisane jest za pomocą istotnych stwierdzeń, prostych faktów, reguł i sposobów wnioskowania z jego użyciem, ujętych w dobrze określone ramy. Ćwierć wieku pracy kosztem ponad 600 osobolat dało około 3 milionów faktów, a każdy z nich powiązany jest z 10-100 innymi, więc liczba relacji w tym systemie sięga dziesiątek milionów. Jest to pierwszy system AI wykorzystujący globalną ontologię, czyli klasyfikację wszystkich bytów.

Ontologia, jeden z trzech podstawowych działów filozofii, stała się niezwykle ważna dla sztucznej inteligencji. Na konferencji zamykającej projekt 5 generacji komputerów, która odbyła się w Tokyo w 1994 roku po raz pierwszy spotkałem ekspertów od bioinformatyki, którzy interesowali się ontologiami. W biologii molekularnej jak i w medycynie są miliony pojęć – genów, białek, struktur komórkowych, procesów w nich zachodzących, cząsteczek chemicznych, organów ciała, chorób – które trzeba opisać w uporządkowany sposób. Oprócz budowania ontologii zdrowego rozsądku zaczęto budować ontologie specjalistyczne w wielu

dziedzinach. CYC powinien dostarczyć wiedzy ogólnej, umożliwiającej komunikację symboliczną, a po dodaniu specjalistycznej wiedzy stać się superekspertem w różnych dziedzinach. O tym co wie CYC można się przekonać grając z nim w FACTory, grę która weryfikuje prawdziwość wiadomości w nim zgromadzonych (www.cyc.com). Większość bazy wiedzy CYC dostępna jest już publicznie. Ontologia CYC w połączeniu z Wikipedią ma utworzyć Cyclopedię o uporządkowanej strukturze, jest trochę zastosowań medycznych i wiele wojskowych, ale jedyny komercyjny produkt z wykorzystaniem tego systemu, CyCSecure dotyczy zagadnień bezpieczeństwa sieci komputerowych.



W latach 1990 technologia systemów ekspertowych stała się w wielu profesjonalnych zastosowaniach codziennością i nikt już nie podkreślał, że stoi za tym sztuczna inteligencja. Inspiracją do badań nad AI stały się prace z psychologii poznawczej, próba zrozumienia ludzkiego intelektu, badanie procesów myślenia w czasie gry w szachy lub rozwiązywania rzeczywistych problemów, zapoczątkowanych przez Newella i Simona. Za badanie procesów podejmowania decyzji Herbert Simon otrzymał w 1978 roku Nagrodę Nobla z ekonomii.

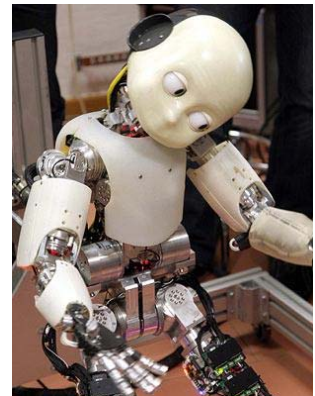
Systemy oparte na wiedzy nie wystarczają do zbudowania automatycznego kierowcy czy robota, który powinien rozumieć to co słyszy, widzi czy odczuwa podnosząc delikatnie szklankę. Wymaga to przede wszystkim analizy sygnałów, rozpoznawania w nich istotnych struktur i pamiętania wzorców, intuicyjnego rozumienia fizyki i sterowania ruchami robota, a dopiero na tej podstawie rozwiązywania problemów czy rozumowania na poziomie eksperta. Wszystkie te czynności wymagają inteligencji, którą mają zwierzęta. „Słonie nie grają w szachy”, zauważył Rodney Brooks, zapoczątkowując całkiem nowy nurt w robotyce, oparty na symulacji procesów rozwojowych dziecka, który musi się nauczyć jak działać w rzeczywistym świecie. Projekt budowy humanoidalnego robota Cog, realizowany od 1994 w jego laboratorium na MIT, zerwał z próbami reprezentacji i manipulacji wiedzy. Inteligencja powinna rozwinąć się sama, jako wynik

He would play chess with the elephant
(who thought and thought before making a move).



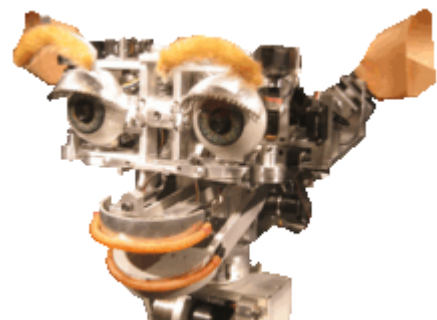
interakcji z opiekunami robota, integracji informacji ze wszystkich zmysłów koniecznej do sterowania jego ciałem, ucieleśnienia umysłu sterującego ciałem. W mózgu nie ma CPU centralnego kontrolera, w oparciu o proste odruchy rozwijane są nowe umiejętności. Ludzie nie tworzą pełnych, wiernych reprezentacji świata, ale potrafią się w nim znaleźć. Wiele niespójnych reprezentacji może się przydać w różnych sytuacjach. Cóż miał się rozwijać w ten sam sposób, budując swoją sieć neuronalną przez uczenie się na podstawie wyników własnych działań.

Robotyka rozwojowa nawiązywała do tradycji fenomenologii „bycia w świecie” Heideggera, filozofii percepcji Merleau-Ponty i innych. Zaczęto studiować prace z psychologii rozwojowej, przyglądać się niemowlętom, uwzględniać rolę emocji, motywacji, ciekawości. Gerald Edelman (Nobel w 1978 z medycyny za prace nad układem immunologicznym) stworzył serię robotów Nomad/Darwin, badając wpływ motywacji na rozwój zdolności poznawczych. Dziecko chce



wszystkiego dotknąć, posmakować, obejrzeć, bo ma wewnętrzną motywację by szukać doznań zmysłowych. Podobnie roboty Edelmana, kierowane chęcią zwiększenia stymulacji swoich zmysłów poszukują oświetlonych przedmiotów, zbliżają się do nich by je dotknąć i posmakować. Rozwinęły się z tego złożone formy zachowania. Cóż również wykształcił wiele interesujących zachowań, potrafił śledzić rozmówców wzrokiem, wyciągać do nich rękę by odebrać trzymany przedmiot, ale jego inteligencja nie przekroczyła poziomu niemowlaka.

Robotyka rozwojowa jest nadal silnym nurtem, zwłaszcza w Europie. W laboratorium Brooksa na MIT Cynthia Breazeal zbudowała głowę robota, wyposażonego w zmysł równowagi, słuch i wzrok, reagującego emocjonalnie ruchem całej głowy, elementami twarzy i głosem. Interakcja tego robota z ludźmi przypominała zabawę z domowym zwierzątkiem. Rola emocji w



podejmowaniu decyzji znana była z wcześniejszych badań nad mózgiem. Próba zrozumienia emocji ludzi na podstawie analizy ich wyrazu twarzy, głosu i gestów stała się ważnym i nadal aktualnym tematem badań. Mechanizmy emocjonalne nie są tak skomplikowane jak procesy odpowiedzialne za myślenie i używanie języka naturalnego. Nawet prymitywne zwierzęta

wykazują emocje, podczas gdy język - w odróżnieniu od prostych form sygnalizacji i komunikacji - jest domeną, w której homo sapiens daleko odstaje od innych gatunków.

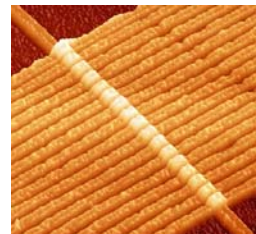
Praktycznym rezultatem prac Brooksa było powstanie firmy iRobot, której był współzałożycielem. Firma produkuje liczne autonomiczne roboty do użytku domowego, zdolne do orientacji w przestrzeni i samodzielnego działania. Do urządzeń czyszczących zaliczają się odkurzacze Roomba, zmywarki podłogi Scooba, roboty do czyszczenia basenu i kanałów. Produkowana jest cała seria robotów do zastosowań wojskowych, podwodnych, a nawet elastycznych robotów przeciskających się przez szczeliny. Świat powoli zapełni się autonomicznymi robotami. Robot NASA Pathfinder musiał sobie sam radzić na Marsie, samoloty Predator MQ-9 podejmują wiele autonomicznych decyzji, latając regularnie z misjami bojowymi. W 1998 roku samochód sterowany komputerem bez udziału człowieka przejechał przez całe USA, w 2005 roku konkurs jazdy automatycznie sterowanych samochodów przez pustynię (211 km) ukończyło 5 pojazdów, a rok później zawody w warunkach miejskich (96 km) ukończyło 6 samochodów. Firma Google zainwestowała w rozwój takich samochodów bez kierowcy i po przejechaniu 250.000 km bez wypadków wystąpiła o zgodę na ich dopuszczenie do regularnego ruchu w stanie Nevada. Głosowanie odbędzie się już w czerwcu tego roku.

Chociaż test Turinga jest nadal odległym celem, w dziedzinie analizy języka naturalnego i kojarzenia faktów jest ciągły postęp. Wyszukiwarka Wolfram Alpha (www.wolframalpha.com) potrafi odpowiadać na wiele pytań wymagających ocen numerycznych, np. ile jest atomów w kropli wody? Po wykonaniu analizy językowej wybierana jest jedna z ponad 1000 domen, algorytmy i równania wybierane z puli ponad 50.000 działają na ponad 10.000 miliardów danych. W lutym 2011 roku program IBM Watson zmierzył się z dwoma mistrzami teleturnieju Jeopardy (w Polsce znanym jako Va Banque), odpowiadając na pytania z różnych dziedzin. Watson wygrał



prawie trzy razy więcej niż eksperci. Poprawność odpowiedzi sięgała 85-95%. Jego baza danych uwzględnia encyklopedie, słowniki, artykuły, bazy leksykalne, literaturę.

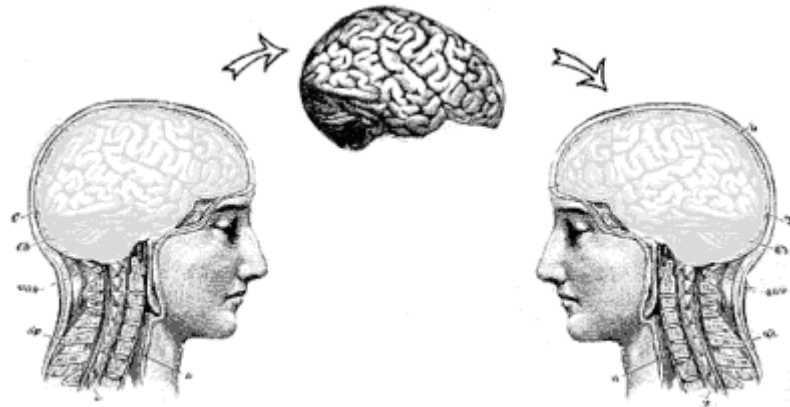
To nadal zaledwie początek możliwości sztucznej inteligencji. Na początku XXI wieku co sekundę rodziło się 0.5 mld tranzystorów (koszt jednego to zaledwie 1/10.000.000 dolara) i około 100 mld neuronów w ludzkich mózgach, ale te proporcje już się odwracają. Superkomputery zaczynają dorównywać szybkością mózgom: chiński Tianhe-1A w 2010 roku oferował moc obliczeniowa rzędu 2.5 milionów miliardów operacji na sekundę (taką jednostkę nazywa się Petaflopem) używając w tym celu ponad 200 tysięcy rdzeni procesorów prowadzących obliczenia. Architektura komputerów wykorzystujących nowe elementy elektroniczne zwane memristorami, budowanych dzięki nanotechnologiom struktur zachowujących się jak synapsy neuronów, otwiera drogę do prawdziwych neurokomputerów. W ramach amerykańskiego projektu SyNAPSE budowany jest taki neurokomputer, który ma szanse osiągnąć złożoność porównywalną z ludzkim mózgiem. Komputery kwantowe, jeśli tylko uda się zbudować stabilnie działające maszyny tego rodzaju, będą mogły rozwiązywać problemy niedostępne naszym umysłom.



W najbliższym dziesięcioleciu możemy się spodziewać dalszych postępów w wykorzystywaniu implantów przywracających słuch i wzrok; na początku 2011 roku pierwsza komercyjna sztuczna siatkówka zatwierdzona została w Europie, Second Sight Medical Product). W dalszej przyszłości bezpośrednia integracja z mózgiem pozwoli na rozszerzenie doznań zmysłowych i możliwości poznawczych, bezpośrednie sprzężenie mózgow z komputerami już stało się ważnym tematem badawczym. Dostęp do dowolnej informacji będzie natychmiastowy, ale nie oznacza to, że będziemy automatycznie wiedzieć, o co warto pytać i rozumieć odpowiedzi. Systemy AI będą nam doradzać we wszystkich dziedzinach. Rola edukacji ulegnie całkowitej zmianie.

Co będzie możliwe za kolejne 20-30-50 lat? Nie mamy pojęcia! Na pewno świat nie będzie podobny do dzisiejszego. Za równowartość 1000 euro będzie można kupić (neuro)komputer (kwantowy?) o mocy 1000 ludzkich mózgow. Sztuczny intelekt, zagnieżdżony w takich komputerach będzie połączony z innymi tworząc jedną całość i tworząc nową wiedzę, która przestanie być zrozumiała dla ludzi. Fizyczna, 3-wymiarowa przestrzeń będzie zapewne mało

interesująca, ewolucja myśli przeniesie się w wirtualne wielowymiarowe światy. Sposób postrzegania i przeżywania świata przez większość ludzi zanurzonych w takich światach stanie się zupełnie niepodobny do obecnego. Być może przeprowadzka z umysłu do umysłu sztucznego i odwrotnie będzie możliwa, być może sprzężenie pomiędzy umysłami stanie się na tyle silne, by powstał jeden umysł ...



Pogląd, że maszyny są głupie i zawsze takie będą, jest chowaniem głowy w piasek, pisał Alan Turing w 1950 roku. Jest to pogląd niebezpieczny; inteligencja na poziomie ludzkim szybko doprowadzi do inteligencji znacznie wykraczającej poza naszą.

Włodzisław Duch zajmuje się neuroinformatyką kognitywną, jest kierownikiem Katedry Informatyki Stosowanej UMK, oraz Prezydentem European Neural Network Society. Jego strona dostępna jest po napisaniu „W. Duch” w dowolnej wyszukiwarce internetowej.