

Sztuczne mózgi

Tutaj przedstawiono ideę „Evolvable Hardware”, która stosuje algorytmy ewolucyjne do generowania programowalnego sprzętu jako środka do osiągnięcia sztucznej inteligencji. Sieci neuronowe oparte na automatach komórkowych są rozwijane w różnych modułach, które stanowią komponenty sztucznych mózgów. Przedstawiono wyniki z poprzednich modeli i plany przyszłych prac.

Wstęp

W tych wczesnych latach nowego tysiąclecia jest właściwe, aby radykalnie nowa technologia zadebiutowała, która pozwoli ludzkości budować sztuczne mózgi, przedsięwzięcie, które może zdefiniować i ubarwić XXI wiek. Technologia ta nazywana jest „Evolvable Hardware” (lub po prostu „E-Hard” w skrócie). Evolvable hardware stosuje algorytmy genetyczne (symulowaną ewolucję darwinowską) do generowania programowalnych urządzeń logicznych (PLD, programowalny sprzęt), umożliwiając ewolucję obwodów elektronicznych z prędkością elektroniczną i na poziomach złożoności, które wykraczają poza intelektualne granice projektowania ludzkich inżynierów elektroniki. Dziesiątki tysięcy (i większe wielkości) takich ewolucyjnych obwodów można połączyć, aby utworzyć określone przez człowieka architektury sztucznego mózgu. Pod koniec lat 80. autor zaczął bawić się algorytmami genetycznymi i ich zastosowaniem do ewolucji sieci neuronowych. Algorytm genetyczny symuluje ewolucję systemu, wykorzystując darwinowską strategię „przetrwania najsilniejszych”. Istnieje wiele odmian algorytmów genetycznych (ewolucyjnych). Jedną z najprostszych metod wykorzystuje populację ciągów bitów (ciąg 0 i 1) zwanych „chromosomami” (analogicznie do biologii molekularnej) do kodowania rozwiązań problemu. Każdy chromosom ciągu bitów może zostać zdekodowany i zastosowany do danego problemu. Jakość rozwiązania określona przez chromosom jest mierzona i otrzymuje wynik liczbowy, zwany „dopasowaniem”. Każdy członek populacji konkurujących chromosomów jest klasyfikowany według swojego dopasowania. Chromosomy o niskim wyniku są eliminowane. Chromosomy o wysokim wyniku mają kopie wykonane z nich (ich „dzieci” w następnym „pokoleniu”). W związku z tym przeżywają tylko najsilniejsi. W dzieciach wprowadzane są losowe zmiany, zwane „mutacjami”. W większości przypadków mutacje powodują spadek dopasowania zmutowanego chromosomu, ale czasami dopasowanie wzrasta, sprawiając, że chromosom dziecka jest bardziej dopasowany niż jego rodzic (lub rodzice, jeśli dwoje rodziców łączy bity seksualnie”, aby wytworzyć chromosom dziecka). Ten lepiej przystosowany chromosom dziecka ostatecznie wyprze swoich mniej przystosowanych rodziców z populacji w przyszłych pokoleniach, aż do momentu, gdy on sam zostanie wyparty przez swoje bardziej przystosowane potomstwo lub bardziej przystosowane potomstwo innych rodziców. Po setkach pokoleń tego cyklu „testuj, wybieraj, kopiuuj, mutuj” systemy mogą ewoluować całkiem pomyślnie, działając zgodnie z pożądaną specyfikacją przystosowania. Sieci neuronowe to połączone sieci symulowanych komórek mózgowych. Pojedyncza symulowana komórka mózgowa (neuron) odbiera sygnały z sąsiednich neuronów, które „waży”, mnożąc siłę sygnału przychodzącego S_i przez liczbowy współczynnik ważenia W_i , aby utworzyć iloczyn $S_i W_i$. Suma wszystkich przychodzących ważonych sygnałów jest tworzona i porównywana z liczbą wartością progową neuronu T . Jeśli suma ma wartość większą niż T , neuron „wystreli” sygnał wyjściowy, którego siła zależy od tego, o ile suma jest większa od progu T . Sygnał wyjściowy przemieszcza się wzdłuż rozgałęzionej ścieżki neuronu na zewnątrz, zwanej „aksonem”. Rozgałęziony akson łączy się i przekazuje sygnał do innych rozgałęzionych ścieżek zwanych „dendrytami”, które przekazują sygnał do innych neuronów. Poprzez dostosowanie współczynników ważenia i połączenie sieci w odpowiedni sposób można zbudować sieci neuronowe, które mapują sygnały wejściowe na sygnały wyjściowe w pożądanym sposób. Pierwsze próby połączenia algorytmów genetycznych (GA) z sieciami neuronowymi (NN) ograniczały się do statycznych (o stałej wartości) danych wejściowych i wyjściowych (bez dynamiki). To ograniczenie wydało się autorowi nieuzasadnione, więc zaczął eksperymentować z

dynamicznymi danymi wejściowymi i wyjściowymi. Pierwsza udana próba w tym zakresie doprowadziła do tego, że para patyczakowatych nóg zaczęła chodzić, pierwsze rozwinięte, kontrolowane przez sieć neuronową, dynamiczne zachowanie. Jeśli można wyewoluować jedno zachowanie, można wyewoluować wiele, więc stało się możliwe wyobrażenie sobie całej biblioteki wyewoluowanych zachowań, na przykład, aby uzyskać symulowany programowo czworonożny chód prosty, skręcanie w lewo, skręcanie w prawo, dziobanie jedzenia, kopulację itp., z jednym oddzielnie wyewoluowanym obwodem sieci neuronowej lub modułem na zachowanie. Zachowania można było płynnie przełączać, podając wyjścia modułu generującego wcześniejsze zachowanie do wejść modułu generującego późniejsze zachowanie. Poprzez ewolucję modułów, które mogłyby wykrywać sygnały pochodzące ze środowiska, np. detektory siły sygnału, detektory częstotliwości, detektory ruchu itp., zachowania można było zmieniać w odpowiednich momentach. Symulowany czworonożny („Lizzy”) mógł zacząć wykazywać oznaki inteligencji, dzięki posiadaniu sztucznego układu nerwowego o coraz większym stopniu wyrafinowania. W umyśle autora zaczęła pojawiać się myśl, że możliwe byłoby zbudowanie sztucznych mózgów, gdyby tylko w jakiś sposób można było połączyć dużą liczbę wyewoluowanych modułów, aby działały jako zintegrowana całość. Autor zaczął marzyć o zbudowaniu sztucznych mózgów. Jednakże powyższe podejście miało pewien problem. Za każdym razem, gdy do symulacji (na komputerze Mac 2) na początku lat 90. dodawano nowy moduł (rozwiniętej sieci neuronowej), ogólna prędkość symulacji spadała, aż nie było już praktyczne posiadanie więcej niż tuzina modułów. W jakiś sposób cały proces musiał zostać przyspieszony, co doprowadziło do marzenia o zrobieniu tego wszystkiego sprzętowo, z prędkością sprzętową.

Evolvable Hardware

Wizyta u kolegi z dziedziny inżynierii elektronicznej na George Mason University (GMU) w stanie Wirginia w USA latem 1992 r. doprowadziła autora do pierwszego zetknięcia się z układami FPGA (Field Programmable Gate Arrays). Układ FPGA to tablica (macierz) elektronicznych bloków logicznych, których funkcje Boole’a (i, lub, nie), połączenia między blokami i wejścia/wyjścia mogą być programowane lub „konfigurowane” (używając terminu technicznego) przez poszczególnych użytkowników, więc jeśli projektant logiki popełni błąd, można go szybko i łatwo naprawić poprzez przeprogramowanie. Układy FPGA są obecnie bardzo popularne wśród inżynierów elektroniki. Niektóre układy FPGA są oparte na pamięci S-RAM (Static RAM), a zatem można je przeprogramowywać nieograniczoną liczbę razy. Jeśli układ FPGA może również akceptować losowe konfigurujące ciągi bitów, staje się on odpowiednim urządzeniem do ewolucji. To objawienie bardzo podekscytowało autora w 1992 r., ponieważ zdał sobie sprawę, że możliwe jest rozwijanie elektronicznych obwodów neuronowych z prędkością elektroniczną, a tym samym przewyższenie problemu powolnej ewolucji i prędkości wykonywania w oprogramowaniu na komputerze osobistym. Autor zaczął głosić ewangelię „ewolucyjnego sprzętu”, jak to nazywał, swoim kolegom w dziedzinie „obliczeń ewolucyjnych (EC), które alternatywnie można by nazwać „ewolucyjnym oprogramowaniem” lub „E-Soft”. Pomysł powoli się przyjął, tak że do roku 2002 odbył się szereg światowych konferencji, a czasopisma naukowe poświęcone temu tematowi zaczęły się pojawiać. W drugiej połowie lat 90. pole E-Hard zostało pobudzone przez obecność określonej ewolucyjnej rodziny chipów wyprodukowanych przez firmę z Doliny Krzemowej w Kalifornii o nazwie Xilinx, oznaczonych jako seria XC6200. Ta rodzina chipów (z różną liczbą bloków logicznych na typ chipa) miała kilka zalet w porównaniu z innymi rekonfigurowalnymi rodzinami chipów. Architektura układu była publicznie znana (nie była tajemnicą firmy), co pozwalało badaczom na zabawę nią. Układ mógł akceptować losowe konfiguracyjne ciągi bitów bez eksplozji (co jest ważne dla ewolucji, która wykorzystuje losowe ciągi bitów), a po trzecie i bardzo ważne, był częściowo rekonfigurowalny na bardzo drobnym poziomie, co oznacza, że jeśli zmutowano tylko kilka bitów w długim konfiguracyjnym ciągu bitów, zmieniono (rekonfigurowano) tylko odpowiadające im komponenty układu, bez konieczności

ponownej rekonfiguracji całego układu. Ta trzecia cecha umożliwiła szybką rekonfigurację, co sprawiło, że układ stał się ulubionym układem wśród użytkowników E-Hard. Niestety, Xilinx zaprzestał produkcji serii XC6200 i koncentruje się na swojej nowej rodzinie układów multi-megagate o nazwie „Virtex”, ale układy Virtex są mniej drobnoziarniste w rekonfiguracji niż rodzina XC6200, więc użytkownicy E-Hard czują się trochę wykluczeni. Mijmy nadzieję, że Xilinx i podobni producenci ujrzą światło i sprawią, że przyszłe generacje ich chipów będą bardziej „ewolucyjne”, dzięki posiadaniu wyższego stopnia drobnoziarnistej rekonfigurowalności. Jak widać poniżej, autor wybrał chip Xilinx XC6264 jako tezę dla swojej pracy nad budową sztucznego mózgu (zanim zapasy się wyczerpały). Podstawowa metodologia tej pracy opiera się na „ewolucyjnym sprzęcie”.

Modele sieci neuronowych

Zanim omówimy ewolucję modelu neuronowego w sprzęcie z prędkością sprzętową, najpierw trzeba wiedzieć, czym jest model neuronowy. Przez lata autor miał mgliste pojęcie o możliwości umieszczenia milionów sztucznych neuronów w gigabajtach pamięci RAM i uruchomienia tej ogromnej przestrzeni jako sztucznego mózgu. Pamięć RAM jest dość tania, więc wydawało się rozsądne, aby w jakiś sposób osadzić sieci neuronowe, dużą ich liczbę, w pamięci RAM, ale jak? Rozwiązaniem wybranym przez autora było użycie automatów komórkowych (CA). Dwuwymiarowe (2D) CA można sobie wyobrazić jako wielokolorową szachownicę, której wszystkie pola mogą zmieniać swój kolor w rytm zegara zgodnie z pewnymi regułami. Te reguły zmiany koloru (lub stanu) automatów komórkowych przyjmują następującą formę. Skoncentruj się na konkretnym polu, które ma kolor pomarańczowy, powiedzmy. Spójrz na cztery sąsiednie kolory pól. Jeśli górny kwadrat jest czerwony, prawy kwadrat jest żółty, dolny kwadrat jest niebieski, a lewy kwadrat jest zielony, to przy następnym tyknięciu zegara centralny pomarańczowy kwadrat stanie się brązowy. Tę regułę można wyrazić zwięźle w postaci:

IF (C = orange) \wedge (U = red) \wedge

(R = yellow) \wedge (B = blue) \wedge (L = green)

THEN (C = brown)

lub jeszcze bardziej zwięźle, w formie:

orange.red.yellow.blue.green \implies brown

Używając tysięcy takich reguł, można było sprawić, że CA zachowywały się jak sieci neuronowe, które rosły, wysyłały sygnały i ewoluowały. Niektóre wczesne eksperymenty wykazały, że te obwody można ewoluować, aby wykonywać takie zadania, jak generowanie sygnału wyjściowego, który oscyluje z dowolnie wybraną częstotliwością, który generuje maksymalną liczbę synaps w danej objętości itp. Jednak duża liczba reguł, aby ta oparta na CA sieć neuronowa działała, stanowiła problem. Wersja 2D wymagała 11 000 reguł. Wersja 3D wymagała ponad 60 000 reguł. Nie było możliwości, aby tak duże liczby można było wdrożyć bezpośrednio w elektronice, ewoluując z prędkością elektroniczną. Potrzebny był alternatywny model, który miał bardzo mało reguł, tak mało, że można je było zaimplementować bezpośrednio w układach FPGA, umożliwiając w ten sposób rozwój mózgu poprzez ewolucję obwodów sieci neuronowych w ciągu sekund, a nie dni, jak to często bywa przy użyciu metod ewolucji oprogramowania. Uproszczony model zostanie opisany bardziej szczegółowo, ponieważ jest to model faktycznie zaimplementowany w ewoluującym sprzęcie. Jest to model 3D, ponownie oparty na automatach komórkowych, ale znacznie prostszy. Neuron jest modelowany przez pojedynczą komórkę CA 3D. Ścieżki CA (aksony i dendryty) mają szerokość tylko 1 komórki, zamiast 3 ell szerokości we wcześniejszym modelu. Instrukcje wzrostu są początkowo rozprowadzane w całej przestrzeni CA 3D (patrz rys. 3), zamiast być przekazywane przez ścieżki CA . Sygnalizacja neuronowa w nowszym

modelu jest tylko 1-bitowa, w porównaniu do 8-bitowych sygnałów we wcześniejszym modelu. Takie ograniczenia obniżą ewolucyjność obwodów, ale w praktyce okazuje się, że ewolucyjność jest nadal wystarczająca dla większości celów. W fazie wzrostu pierwszą rzeczą, którą się robi, jest pozycjonowanie neuronów. Dla każdej możliwej pozycji w przestrzeni, w której można umieścić neuron, używany jest odpowiadający jej bit w chromosomie. Jeśli ten bit jest 1, neuron jest umieszczany w tej pozycji. Jeśli bit jest 0, żaden neuron nie jest umieszczany w tej pozycji. Każdej komórce 3D CA przydzielane jest 6 bitów wzrostu z chromosomu, jeden bit na ścianę sześcienną. Podczas pierwszego tyknięcia zegara wzrostu każdy neuron sprawdza bit na każdej ze swoich 6 ścian. Jeśli bit jest 1, sąsiadująca pusta komórka dotykająca odpowiadającej jej ściany neuronu staje się komórką aksonu. Jeśli bit jest 0, sąsiadująca pusta komórka staje się komórką dendrytu. W ten sposób neuron może wyhodować maksymalnie 6 aksonów lub 6 dendrytów i wszystkie kombinacje pomiędzy nimi. Podczas następnego taktu zegara każda pusta komórka patrzy na bit powierzchni wypełnionego sąsiada, który jej dotyka. Jeśli ten bit powierzchni wypełnionej komórki jest 1, wtedy pusta komórka staje się typem komórki (aksonem lub dendrytem) dotykającego wypełnionego sąsiada. Pusta komórka ustawia również wskaźnik w kierunku swojej komórki nadrzędnej – na przykład, jeśli komórka nadrzędna leży na zachód od pustej komórki, pusta komórka ustawia wewnętrzny wskaźnik, który mówi „zachód”. Te „wskaźniki nadrzędne (PP)” są używane podczas fazy sygnalizacji neuronowej, aby powiedzieć sygnałom 1-bitowym, w którą stronę mają się poruszać, gdy przemieszczają się wzdłuż aksonów i dendrytów. Ten proces wzrostu komórkowego trwa przy każdym takcie zegara przez kilkaset taktów, aż rozgałęzienie aksonów i dendrytów zostanie nasycone w przestrzeni 3D. W implementacji sprzętowej tego uproszczonego modelu przestrzeń CA składa się z sześcienu $24 \times 24 \times 24$ („makrosześcianu”) komórek CA 3D, tj. około 14 000 z nich. Na 6 ścianach makrosześcianu, wzrosty aksonów i dendrytów owijają się wokół przeciwległej makrościany, tworząc w ten sposób kształt „toroidalny” (pączek). Istnieją wstępnie określone punkty wejściowe i wyjściowe (maksymalnie 188 punktów wejściowych i maksymalnie 4 punkty wyjściowe, chociaż w praktyce zwykle używany jest tylko jeden punkt wyjściowy, aby wspierać ewolucyjność). Użytkownik określa, które punkty wejściowe i wyjściowe mają być używane dla danego modułu. W punkcie wejściowym ustawiana jest komórka aksonu, która rozrasta się w przestrzeni. Podobnie w punkcie wyjściowym, gdzie ustawiana jest komórka dendrytu. W fazie sygnalizacji 1-bitowe sygnały neuronowe poruszają się w tym samym kierunku, w którym nastąpił wzrost aksonu, i w kierunku przeciwnym do kierunku, w którym nastąpił wzrost dendrytu. Mówiąc inaczej, sygnał podąża w kierunku wskaźników nadrzędnych (PP), jeśli porusza się w dendrycie, i podąża w dowolnym kierunku innym niż wskaźniki nadrzędne (PP), jeśli porusza się w aksonie. Sygnał wejściowy pochodzący z innego neuronu lub ze światła zewnętrznego przemieszcza się wzdłuż aksonu, aż akson zderzy się z dendrytem. Punkt zderzenia nazywa się „synapsą”. Sygnał przechodzi do dendrytu i porusza się w kierunku neuronu dendrytu. Każdej ścianie sześcienu neuronu przypisany jest genetycznie bit znaku. Jeśli ten bit jest równy 1, sygnał doda 1 do 4-bitowej wartości licznika neuronu. Jeśli bit jest równy 0, sygnał odejmie 1 od licznika neuronu. Jeżeli wartość licznika przekroczy wartość progową, zwykle równą 2, licznik resetuje się do zera, a neuron „aktywuje się”, wysyłając 1-bitowy sygnał do swoich aksonów podczas kolejnego taktu zegara.

Maszyna CAM-Brain (CBM)

Ewolucyjnym urządzeniem sprzętowym, które implementuje powyższy model sieci neuronowej, jest maszyna automatów komórkowych (CAM), nazywana maszyną CAM-Brain (CBM). Termin CAM-Brain oznacza, że sztuczny mózg ma być osadzony wewnątrz automatów komórkowych. CBM to specjalny sprzęt, który bardzo szybko ewoluuje obwody neuronowe. Składa się w dużej mierze z układów XC6264 (programowalnego sprzętu) firmy Xilinx (72 z nich), które razem mogą ewoluować moduł obwodu sieci neuronowej w ciągu kilku sekund. CBM wykonuje algorytm genetyczny na ewoluujących obwodach neuronowych, wykorzystując populację około 100 z nich i przechodząc przez kilkaset generacji, tj.

dziesiątki tysięcy wzrostów obwodów i pomiarów sprawności. Po pomyślnej ewolucji obwodu jest on pobierany do gigabajta pamięci RAM. Proces ten zachodzi do 64000 razy, co skutkuje 64000 pobranymi modułami obwodów w pamięci RAM. Zespół architektów mózgu (BA) zdecydował już, które moduły mają zostać rozwinięte, jakie są ich indywidualne funkcje i jak mają być połączone. Gdy wszystkie moduły zostaną rozwinięte i określone zostaną ich połączenia, CBM działa w drugim trybie. Aktualizuje pamięć RAM zawierającą sztuczny mózg z szybkością 130 miliardów aktualizacji komórek 3D automatów komórkowych na sekundę. Jest to wystarczająco szybko, aby sterować w czasie rzeczywistym robotem-kotem „Robokitty”, opisanym poniżej. CBM składa się z 6 głównych komponentów lub jednostek opisanych tutaj pokrótce.

Jednostka automatów komórkowych: Jednostka automatów komórkowych zawiera komórki automatów komórkowych, w których neurony rozwijają aksony i dendryty oraz przekazują swoje sygnały.

Jednostka pamięci genotypu/fenotypu: Jednostka pamięci genotypu/fenotypu zawiera 100-tysięczne chromosomy bitowe, które określają wzrost obwodów neuronowych. Jednostka pamięci fenotypu przechowuje stan komórek CA (puste, neuron, akson, dendryt).

Jednostka oceny sprawności: Jednostka oceny sprawności zapisuje bity wyjściowe, konwertuje je do postaci analogowej, a następnie ocenia, jak bardzo pasują do siebie docelowe i rzeczywiste wyjścia.

Jednostka algorytmu genetycznego: Jednostka algorytmu genetycznego wykonuje GA na populacji konkurujących obwodów neuronowych, eliminując słabsze obwody i odtwarzając oraz mutując silniejsze obwody.

Jednostka pamięci połączeń modułów: Jednostka pamięci połączeń modułów przechowuje specyfikacje połączeń międzymodułowych BA (architekta mózgu), na przykład „drugie wyjście modułu 3102 łączy się ze 134. wejściem modułu 63195”.

Jednostka interfejsu zewnętrznego: Jednostka interfejsu zewnętrznego kontroluje wejście/wyjście sygnałów ze świata zewnętrznego/do świata zewnętrznego, np. czujników, oczu kamery, uszu mikrofonu, silników, wejścia/wyjścia anteny itp.

Kształt i kolor CBM są symboliczne (patrz rys. 4, 5). Zakrzywiona warstwa zewnętrzna przedstawia wycinek kory mózgowej człowieka. Szara część zawierająca płytki elektroniczne przedstawia „istotę szarą” (ciała nerwowe) mózgu, a biała część zawierająca zasilanie przedstawia „istotę białą” (aksony) mózgu. Pierwszy CBM i wspierające go pakiety oprogramowania zostały wdrożone w 1999 r., a faktyczne wykorzystanie maszyny w celach badawczych rozpoczęło się w tym samym roku. Wyniki tych testów i doświadczenie zdobyte w wykorzystywaniu CBM do projektowania sztucznych architektur mózgu powinny stanowić treść przyszłych artykułów, takich jak „Architektury sztucznego mózgu”.

Moduły ewolucyjne

Ponieważ sygnały neuronowe w modelu implementowanym przez CBM wykorzystują pojedyncze bity, wejścia i wyjścia modułu neuronowego również muszą mieć formę sygnału 1-bitowego. Tabela 1 przedstawia docelowy (pożądany) ciąg binarny wyjściowy i najlepszy wynik ewolucyjny (symulowany programowo), pokazując, że ewolucja takich ciągów binarnych jest możliwa przy użyciu modelu implementowanego przez CBM. Aby zwiększyć użyteczność CBM, stworzono algorytmy, które konwertują dowolną krzywą analogową na odpowiadający jej ciąg bitów (serię jedynek i zer) i odwrotnie, umożliwiając użytkownikom myślenie wyłącznie w kategoriach analogowych. Wejścia analogowe są automatycznie konwertowane na binarne i wejściowe do modułu. Podobnie wyjście binarne jest konwertowane na analogowe i porównywane z analogowymi krzywymi docelowymi.

Rysunek 6 przedstawia losową analogową krzywą docelową i najlepiej ewolucyjną krzywą. Należy zauważyć, że ewoluowana krzywa podążała za krzywą docelową dość dobrze tylko przez ograniczony czas, ilustrując „ewolucyjną pojemność modułu” (MEC). Aby wygenerować analogowe krzywe docelowe o nieograniczonej długości czasu (potrzebne do generowania zachowań robota-kotka przez dłuższe okresy czasu), może być konieczne zaprojektowanie systemów wielomodułowych, które wykorzystują formę podziału czasu, przy czym jeden moduł generuje wynik docelowy jednego wycinka czasu. Symulowaliśmy programowo ewolucję wielu modułów (na przykład dwuwymiarowych detektorów wzorców statycznych i dynamicznych, kontrolerów ruchu, modułów decyzyjnych itp.). Doświadczenie pokazuje nam, że ich „ewolucyjność” jest zwykle wystarczająco wysoka, aby wzbudzić entuzjazm. Dla inżynierów ewolucyjnych koncepcja ewolucyjności ma kluczowe znaczenie.

Robot-kotek „Robokitty”

W 1993 roku, kiedy rozpoczął się projekt CAM-Brain, pomysł, że można zbudować sztuczny mózg zawierający miliard neuronów w erze, w której większość sieci neuronowych zawierała dziesiątki do setek neuronów, wydawał się absurdalny. Wczesny sceptycyzm był silny. Potrzebny był sposób, aby pokazać, że sztuczny mózg jest słuszną koncepcją, aby uciszyć krytyków. Autor zdecydował, że sztuczny mózg będzie kontrolował setki zachowań uroczego, naturalnej wielkości robota-kotka, którego mechaniczna konstrukcja jest pokazana poniżej.



Ten robot-kotek „Robokitty” będzie miał około 23 silników i będzie wysyłał i odbierał sygnały radiowe do i z CBM za pośrednictwem anteny. Zachowania kotka są rozwijane w komercyjnym oprogramowaniu „Working Model 3D” (firmy MSC Working Knowledge, Inc.), a wyniki są następnie wykorzystywane jako docelowe formy fal do ewolucji modułów sterujących w CBM. Ewolucja ruchów w oprogramowaniu z prędkością oprogramowania jest sprzeczna z filozofią ewolucyjnego sprzętu, ale uważano ją za nieuniknioną ze względów praktycznych. Na szczęście zdecydowana większość modułów będzie ewoluować z prędkością elektroniczną. Sądząc po wielu zachowaniach i „inteligencji” systemów

sensorycznych i decyzyjnych, dla zwykłego obserwatora powinno być oczywiste, że „za tym stoi mózg”, co sprawia, że robot zachowuje się w sposób tak „koci” jak to tylko możliwe.

Krótkoterminowa i długoterminowa przyszłość

Bezpośrednim celem po zbudowaniu pierwszych CBM było użycie CBM do stworzenia modułowej architektury sztucznego mózgu w celu kontrolowania robotki. Sama konkretność zadania, tj. sprawienie, aby kociak wykonywał setki zachowań i decydował, kiedy przetaczać się między nimi na podstawie decyzji pochodzących z jego systemów sensorycznych i stanów wewnętrznych, wymagały dużego wysiłku, ponieważ należało rozwinąć 64 000 modułów. Oczywiście, gdy prace nad CBM się rozpoczęły, początkowe wysiłki skupiły się na pojedynczych modułach, aby zobaczyć, co CBM może rozwinąć. Niestety, prace te rozpoczęły się dopiero w 2000 r., gdy upadłość poprzedniego laboratorium autora (Starlab) zatrzymała takie prace. Zaplanowano, że po zdobyciu doświadczenia w ewolucji pojedynczych modułów zostaną zbudowane połączone ze sobą systemy wielomodułowe, z dziesiątkami, setkami, tysiącami, dziesiątkami tysięcy modułów, aż do limitu 64 000 modułów. Gdyby ta praca miała zostać ukończona w ciągu dwóch lat, zakładając, że inżynier ewolucyjny (EE) potrzebowałby średnio 30 minut na wymyślenie funkcji i miary sprawności modułu, potrzebny byłby zespół projektowy składający się z 16 osób. Sztuczny mózg drugiej generacji o milionie modułów będzie wymagał około 250 EE. Tak więc problem zbudowania tak dużego sztucznego mózgu byłby nie tylko koncepcyjny, ale również zarządczy. Autor przewiduje, że w ciągu pięciu do dziesięciu lat, jeśli mózg pierwszej generacji okaże się sukcesem, prawdopodobnie powstaną duże organizacje krajowe poświęcone budowaniu mózgu, porównywalne ze sposobem, w jaki rakiety Goddarda przeszły od dwumetrowych zabawek sterowanych przez jednego człowieka do NASA, z dziesiątkami tysięcy inżynierów i budżetem miliardów dolarów. Takie projekty budowy mózgu na skalę krajową otrzymały etykiety, takie jak A-Brain Project (amerykański Narodowy Projekt Budowy Mózgu), E-Brain Project (europejski), C-Brain Project (chiński), J-Brain Project (japoński) itp. Początkowo te sztuczne mózgi będą prawdopodobnie wykorzystywane do tworzenia coraz bardziej inteligentnych robotycznych zwierząt domowych. Później mogą być wykorzystywane do sterowania robotami sprzątającymi domy, robotami-żołnierzami itp. Obliczenia oparte na mózgu mogą wygenerować rynek światowy wart bilion dolarów w ciągu około 10 lat. Roczny rynek komputerów osobistych jest obecnie wart około biliona dolarów na całym świecie. W dłuższej perspektywie, za 50 do 100 lat, sytuacja stanie się o wiele bardziej alarmująca. Technologie XXI wieku umożliwią przechowywanie pamięci 1 bitu na atom i czasy przełączania femtosekundowe (tysięczna część biliona sekundy) (przerzucanie bitów). Logika odwracalna umożliwi obliczenia bez ciepła i tworzenie obwodów 3D, które się nie topią. Teoretycznie można by zbudować komputery kwantowe wielkości asteroidy, które mogłyby się samoskładać i miałyby szybkość przeliczania bitów 10 do potęgi 55 na sekundę. Szacunkowa ludzka moc obliczeniowa to zaledwie 10 do potęgi 16 przeliczania bitów na sekundę, czyli mniej więcej bilion bilionów razy mniej. Dla budowniczych mózgow z świadomością społeczną pismo jest na ścianie. Autor uważa, że globalna polityka naszego nowego stulecia będzie zdominowana przez kwestię dominacji gatunkowej. Czy ludzkość powinna budować boskie „Artilects” (sztuczne intelekty), czy nie? Autor przewiduje wielką wojnę między dwiema grupami ludzkimi, „Kosmistami”, którzy będą opowiadać się za budowaniem artilects, dla których taka aktywność jest naukowo zgodną religią – ogólnym przeznaczeniem gatunku ludzkiego – i „Terrans”, którzy będą się obawiać, że pewnego dnia artilects, z jakiegokolwiek powodu, mogą postanowić eksterminować rasę ludzką. Dla Terran jedynym sposobem, aby mieć pewność, że takie ryzyko nigdy nie zostanie podjęte, jest naleganie, aby nigdy nie budowano artykułów. W ostateczności, aby zachować gatunek ludzki, Terranie mogą eksterminować Kosmistów, jeśli ci ostatni zagrożą zbudowaniem artykułów. Mając broń XXI wieku i ekstrapolując wykres liczby zgonów w głównych wojnach w czasie, dochodzimy do „gigadeath”. Jednym z głównych zadań dzisiejszych budowniczych mózgow jest przekonanie ludzkości, że taki scenariusz nie jest

kawałkiem nie do odrzucenia science fiction, ale przerażającą możliwością. Niektórzy budowniczy mózgowi zaprzestaną swojej pracy z powodu takich obaw. Inni będą kontynuować, napędzani wspaniałością swojego celu – zbudowaniem bogów „artykułów”. Kiedy fizycy jądrowi w latach 30. przewidywali, że pojedyncza bomba atomowa może zniszczyć całe miasto, większość ludzi uważała ich za szaleńców, ale zaledwie 12 lat po tym, jak Leo Szilard wpadł na pomysł reakcji łańcuchowej, Hiroszima została wyparowana. Decyzja, czy budować artefakty, czy nie, będzie najtrudniejszą decyzją, z jaką ludzkość będzie musiała się zmierzyć w naszym nowym stuleciu. Ludzkość będzie musiała wybrać między „budowaniem bogów, a budowaniem naszych potencjalnych eksterminatorów”.

Postscript – lipiec 2002

Ten postscript zawiera krótką aktualizację tego, co działo się z projektem CAM-Brain od czasu napisania powyższego artykułu. Autor pracował w Japonii od 1992 do 1999 roku. W roku 2000 przeniósł się do prywatnego, pionierskiego laboratorium badawczego o nazwie Starlab w Brukseli, Belgia, Europa. Starlab kupił maszynę CAM-Brain Machine (CBM), która została dostarczona latem 2000 roku. Niestety, krach internetowy mocno uderzył w Starlab, co doprowadziło do jego bankructwa w czerwcu 2001 roku. CBM Starlab nie został w pełni opłacony, więc konstruktor tej maszyny, który miał do niej dostęp przez Internet, wyłączył ją, skutecznie zabijając projekt. Zbudowano cztery CBM (jedną w Japonii, dwie w Europie, jedną w USA). Gdy projektant nie był już opłacany, przestał aktualizować oprogramowanie układowe we wszystkich maszynach, więc w efekcie wszystkie są niekompletnie opracowane i nie działają tak, jak powinny. Od września 2001 r. autor jest profesorem nadzwyczajnym na wydziale informatyki na Utah State University w USA, gdzie odpowiada za utworzenie Brain Builder Group i pozyskanie funduszy na stworzenie drugiej generacji maszyny do budowy mózgu o nazwie Brain Building Machine, 2nd Generation (BM2). Jeśli uda się znaleźć fundusze, ta maszyna drugiej generacji będzie wykorzystywać najnowszą generację programowalnych/ewolucyjnych układów scalonych (mianowicie rodzinę układów scalonych „Virtex” firmy Xilinx). Jednak tym razem nalegamy na wewnętrzne doświadczenie w projektowaniu sprzętu. Nie chcemy być ponownie zależni od zewnętrznego projektanta sprzętu z motywacją komercyjną. Tym razem wszystkie osoby zaangażowane w tworzenie BM2 to badacze. Autor ma teraz zespół kilkunastu osób, głównie studentów studiów magisterskich i doktoranckich, którzy uczą się, jak programować i ewoluować sprzęt, korzystając z układów scalonych Xilinx Virtex, i tworzyć coraz bardziej ewolucyjne modele sieci neuronowych, które można wdrożyć w ewolucyjnym sprzęcie. Autor współpracuje również z dwoma innymi kolegami akademickimi z różnych uniwersytetów w USA, którzy mają duże doświadczenie w projektowaniu sprzętu przemysłowego. Wakacje letnie 2002 roku spędziliśmy na opracowywaniu architektury BM2, z zamiarem złożenia głównych wniosków o dotacje w wysokości 1 mln USD na projekt i budowę BM2. Być może przed zakończeniem można wspomnieć tutaj krótko o niektórych wyzwaniach, z jakimi boryka się projekt BM2. BM2 będzie miał oczywiste podobieństwa do CBM. Nadal będzie opierał się na podstawowym założeniu, że poszczególne moduły sieci neuronowej zostaną rozwinięte, a następnie ręcznie złożone w pamięci RAM, aby stworzyć sztuczny mózg. To podstawowe założenie w ogólnym projekcie może zostać zmienione w miarę postępu koncepcji BM2, ale na razie trudno sobie wyobrazić, w jaki sposób można by podjąć podejście niemodułowe. Jednak sama siła prawa Moore’a prędzej czy później zmusi nas do przyjęcia innego podejścia, z prostego powodu, że stanie się niemożliwe dla człowieka wymyślenie i indywidualne rozwinięcie miliona modułów. CBM może obsłużyć 75 000 000 neuronów i 64 000 modułów. Bardzo prawdopodobne, że BM2 będzie w stanie obsłużyć 1 000 000 000 neuronów i 1 000 000 modułów. Milion modułów to po prostu za dużo, aby obsłużyć, co wymaga automatyzacji ewolucji systemów wielomodułowych. To, w jaki sposób zespół autora zajmujący się budową mózgu rozwiąże takie problemy, wciąż nie zostało ustalone. Z drugiej strony prawo Moore'a już dało światu elektroniki programowalne (ewolucyjne) układy scalone z prawie 10 000 000 bramy logicznymi. Do zbudowania sztucznego mózgu składającego się z

miliarda neuronów nie jest potrzebna bardzo duża liczba takich układów scalonych. To jest zachęcający aspekt budowy mózgu, tj. świadomość, że dzisiejsze możliwości układów scalonych na to pozwolą. Prawdopodobnie największe wyzwanie pozostaje takie samo, jak w przypadku CBM, a mianowicie projektowanie samych sztucznych mózgów. Jak można połączyć setki kontrolerów ruchu, tysiące rozpoznawaczy wzorców itp., aby zaprojektować sztuczny mózg, który będzie kontrolował urządzenie robota (kociaka?) z taką różnorodnością i inteligencją, że dorośli będą się nim bawić przez pół godziny? Autor uważa, że pierwsze sztuczne mózgi na planecie powstaną w ciągu najbliższych kilku lat. Gdyby CBM nie został zatrzymany w miejscu, być może w roku 2001 podjęto by pierwszą próbę zbudowania takiego mózgu. Teraz BM2 będzie musiał zostać zbudowany, aby „Utah Brain Project” mógł być kontynuowany. Bądźcie czujni.