

Robotyka

Wstęp

Roboty są powszechnie uważane za mechanicznych ludzi – humanoidalne maszyny zdolne do wykonywania wielu zadań, w które angażujemy się przez cały czas, takich jak chodzenie, mówienie, podnoszenie i przenoszenie rzeczy, a także niektóre z tych, których próbuje większość z nas których należy unikać, jak masowe akty śmierci i zniszczenia. W następnej części przekonamy się, że ten obraz – a właściwie sama idea robota – pochodzi ze świata fikcji. Choć prawdą jest, że te mity i sny przeniknęły do zbiorowej świadomości i niewątpliwie wpłynęły na część prac naukowych w dziedzinie robotyki, obecna rzeczywistość – choć pełna ogromnego zainteresowania i potencjału – jest nieco mniej dramatyczna. W środowisku naukowym typowa robocza definicja robota wygląda mniej więcej tak: fizyczne urządzenie zdolne do autonomicznego lub zaprogramowanego zachowania w świecie, obejmujące interakcje z otoczeniem za pośrednictwem czujników i urządzeń wykonawczych. W przeciwieństwie do maszyn, które do znudzenia wykonują precyzyjne, powtarzalne zadania (np. roboty wykorzystywane w produkcji linii produkcyjnych), od robotów autonomicznych wymaga się odpowiedniego zachowania w każdych okolicznościach. Podobnie jak istoty biologiczne, ich zachowanie musi być generowane samodzielnie, wykorzystując informacje zmysłowe do moderowania swoich reakcji na świat. Aby zapewnić kontekst, rozdział ten rozpoczyna się od krótkiego szkicu historii robotyki, a następnie przedstawia pewne tło tradycyjnych podejść. Pozwala to na lepsze zrozumienie motywacji rozwoju podejść inspirowanych biologią, których omówienie stanowi większą część rozdziału. W ostatnich latach, gdy łaziki planetarne NASA, kroczący humanoidalny robot Asimo Hondy, autonomiczne odkurzacze iRobot, pies-robot Aibo firmy Sony i niezliczone autonomiczne zabawki pobudziły wyobraźnię, nigdy wcześniej nie było takiego impetu w opracowywaniu przydatnych robotów autonomicznych. Jednakże, jak zobaczymy, wyzwania są nadal znaczące.

Wczesna historia

Podczas gdy historie o sztucznych stworzeniach przypominających ludzi sięgają co najmniej mitów starożytnej Grecji, koncepcja ucieleśnionej inteligencji mechanicznej znalazła się, całkiem dosłownie, w centrum uwagi w latach międzywojennych, kiedy w 1921 roku wystawiono sztukę Karela Čapka R.U.R. (Firma Universal Robots z Rossum) przedstawiła światu roboty, tworząc w ten sposób związane z nimi mity i obrazy, które obecnie przenikają naszą kulturę. Był to światowy hit, który poruszył popularną wyobraźnię i wywołał wiele intelektualnej debaty. Spektakl, wywodzący się ze snów i opowieści ludowych starej Europy, opowiadał o masowej produkcji sztucznych humanoidalnych robotników na odizolowanej wyspie. Roboty te powstają w wyniku pewnego rodzaju procesu biochemicznego i są sprzedawane na całym świecie jako tania siła robocza. Po pewnym czasie rozwijają się w nich agresywne emocje i zdając sobie sprawę ze swojej wyższości fizycznej i psychicznej, roboty powstają i niszczą rasę ludzką. Spektakl kończy się bardziej pozytywnie, gdy dwa roboty rozwijają w sobie poczucie miłości i szacunku do życia, stając się prawie nie do odróżnienia od ludzi, których zastąpili. Karel Čapek miał trudności z podjęciem decyzji, jak nazwać sztucznych pracowników, dopóki jego brat Joseph – znany czeski malarz – nie ukuł słowa robot. Wywodzi się od starożytnego czeskiego słowa robot, które oznacza powtarzalną, ciężką pracę. Chociaż od XV wieku zbudowano wiele genialnych automatów mechanicznych, w tym grających w szachy Turków i wzdęte kaczki w XVIII wieku, dopiero pod koniec lat czterdziestych XX wieku urządzenie rozpoznawalne jako robot (w dzisiejszym znaczeniu tego terminu) pojawił się. W 1949 roku W. Gray Walter, neurolog pracujący w Burden Institute w Bristolu i światowy lider w badaniach nad EEG1, zbudował parę maszyn, które nazwał „żółwiami”. Żółwie Graya Waltera były pierwszymi w historii mobilnymi robotami autonomicznymi na kołach. Urządzenia były trójkołowe i miały ochronną „skorupę”. Posiadały czujnik światła, czujnik dotyku, silnik napędowy, silnik sterujący i analogowy „układ nerwowy” oparty na

elektronicznych zaworach. Zamiarem Waltera było pokazanie, że nawet w bardzo prostym układzie nerwowym (żółwie miały dwa sztuczne neurony) złożoność może wynikać z interakcji pomiędzy jego jednostkami. Badając całe ucieleśnione systemy sensomotoryczne, był pionierem stylu badań, który wiele lat później miał stać się bardzo popularny w sztucznej inteligencji i pozostaje nim do dziś. Między Wielkanocą 1948 a Bożym Narodzeniem 1949 zbudował pierwsze żółwie Elmer i Elsie. Były raczej zawodne i wymagały częstej uwagi. W 1951 roku jego technik, pan W. J. „Bunny” Warren, zaprojektował i zbudował sześć nowych żółwi o znacznie wyższym standardzie. Trzy z tych żółwi zostały wystawione na Festiwalu Brytyjskim w 1951 roku; inne były regularnie demonstrowane publicznie w latach pięćdziesiątych. Roboty potrafiły fototaksować (kierować w stronę źródła światła), co oznaczało, że mogły znaleźć drogę do stacji ładowania, gdy poziom naładowania baterii był niski. Nazwał te urządzenia Machina speculatrix ze względu na ich widoczną tendencję do spekulatywnego badania otoczenia. Walter był w stanie zademonstrować wiele interesujących zachowań, gdy roboty wchodziły w interakcję ze swoim otoczeniem i sobą nawzajem. W jednym z eksperymentów umieścił światło na „nosie” żółwia i obserwował, jak robot obserwuje siebie w lustrze. „Zaczął migotać” – napisał. „Twierdzi i podskakuje jak niezdarzy Narcyz”. Walter argumentował, że jeśli takie zachowanie zostanie zaobserwowane u zwierzęcia, „może zostać zaakceptowane jako dowód pewnego stopnia samoświadomości” (Walter 1953). Roboty Waltera stały się bardzo znane, pojawiały się w kronikach filmowych, programach telewizyjnych i licznych artykułach prasowych. Wielu czołowych badaczy robotyki późniejszych pokoleń uznało je za główny wpływ tych technologii na wczesnym etapie rozwoju. Na przykład Rodney Brooks, dyrektor Laboratorium Informatyki i Sztucznej Inteligencji w MIT, zbudował swojego pierwszego robota – wersję Machina speculatrix wykorzystującą tranzystory, a nie zawory – po natknięciu się na książkę Waltera *The Living Mózg* (1953). Walter był główną postacią w dziedzinie cybernetyki, a nazwa wymyślona przez Norberta Wienera, oznaczająca badanie kontroli i komunikacji u zwierząt i maszyn. Ta wysoce interdyscyplinarna dziedzina była prekursorem dużej części współczesnej sztucznej inteligencji i robotyki oraz źródłem obecnej teorii kontroli i komunikacji. Miało to również duży wpływ na neuronaukę i inne gałęzie biologii. Miał ogromny wpływ pod koniec lat czterdziestych i przez całe lata pięćdziesiąte, rozprzestrzeniając się na ekonomię i sztukę, zanim stracił przychylność. Jak zobaczymy, wiele dziedzin wywodzących się z cybernetyki, takich jak sztuczne sieci neuronowe i informatyka ewolucyjna, pojawiło się ponownie w latach 80. XX wieku i obecnie jest silniejsze niż kiedykolwiek. Od tych inspirowanych biologią i raczej eksploracyjnych początków w latach pięćdziesiątych XX wieku zainteresowanie robotyką zaczęło skupiać się na bardziej praktycznych zastosowaniach. Główny nacisk położono na rozwój ramion robotycznych, szczególnie do użytku na liniach produkcyjnych. Raczej stopniowo, w ciągu około dwudziestu lat, ramiona robotyczne i manipulatory stawały się coraz bardziej powszechne w przemyśle ciężkim. Głównym celem klasycznej robotyki przemysłowej jest przesunięcie końca ramienia (w którym znajduje się siłownik, taki jak chwytak, zwany „efektorem końcowym”) do określonego punktu w przestrzeni. Zwykle do tego podchodzi się poprzez znalezienie wymaganych momentów obrotowych przykładanych przez silniki sterujące przegubami ramion, tak aby uzyskana konfiguracja ramion ustawiała efektor końcowy w żądanym położeniu. Sterowanie klasycznymi robotami przemysłowymi często opiera się na rozwiązaniach równań opisujących problem odwrotnej kinematyki (znalezienie kąta, o jaki należy obrócić przeguby, aby uzyskać określone położenie efektora końcowego). Zwykle opierają się one na dokładnej znajomości mechaniki robota i jego otoczenia. Aspekty kontroli wysokiego poziomu obejmują obliczanie pożądanych obrotów stawów i momentów obrotowych wymaganych do ich osiągnięcia. Sterowanie niskopoziomowe jest również potrzebne do zapewnienia interfejsu z siłownikami w celu realizacji żądanych poleceń silnika. Roboty przemysłowe są zaprogramowane do ciągłego powtarzania precyzyjnych manipulacji, takich jak spawanie lub natryskiwanie farby. Chociaż korzystają z czujników, które pomagają kontrolować ich ruchy, nie można powiedzieć, że ich zachowanie jest w jakikolwiek sposób inteligentne. Jeśli samochód na linii produkcyjnej jest źle

ustawiony lub nie ma oczekiwanego kształtu, robot nie będzie w stanie zareagować na nowe okoliczności; może jedynie powtarzać zaprogramowane ruchy. Choć ograniczenia te można pokonać w ściśle kontrolowanym środowisku linii produkcyjnej, stają się one problematyczne, jeśli robot ma być używany w mniej zorganizowanym i przewidywalnym środowisku – na przykład podczas misji eksploracyjnej. W takich scenariuszach robot, zwykle mobilne urządzenie do swobodnego poruszania się, musi wchodzić w interakcję z otoczeniem w znacznie bardziej inteligentny sposób, aby poradzić sobie w hałaśliwym, dynamicznym świecie. Metody kontroli stosowane w przypadku broni przemysłowej nie są już wystarczające. W następnej sekcji skupimy się na „klasycznym” podejściu do inteligentnej robotyki mobilnej.

Klasyczna inteligentna robotyka mobilna

Środowisko pracy robota przemysłowego jest często starannie projektowane, tak aby nie było potrzeby stosowania skomplikowanych informacji zwrotnych sensorycznych; robot wykonuje powtarzalne zadania w sposób dokładny, wydajny, ale zasadniczo nieinteligentny. Bardziej złożone przypadki, dotyczące zagrazonego, dynamicznego lub hałaśliwego otoczenia lub delikatnej manipulacji obiektami, zwykle wymagają bardziej wyrafinowanego sprzężenia zwrotnego i przetwarzania percepcyjnego, takiego jak użycie systemu wizyjnego. To wprowadza nas w świat sztucznej inteligencji i inteligentnej robotyki. Dyskusja w tym obszarze skupi się głównie na autonomicznych robotach mobilnych, ale wiele z bardziej ogólnych podejść do „inteligentnego” sterowania ma zastosowanie do innych form robotów. W latach 1966–1972 Centrum Sztucznej Inteligencji w SRI International (wówczas Stanford Research Institute) przeprowadziło pionierskie badania nad mobilnym systemem robotycznym o nazwie „Shakey”. Robot posiadał system wizyjny, który dawał mu możliwość postrzegania i modelowania otoczenia w ograniczony sposób. Shakey mógł wykonywać zadania wymagające planowania, znajdowania trasy i przestawiania prostych obiektów. Shakey stał się wzorcowym przykładem wczesnej robotyki opartej na sztucznej inteligencji. Robot przyjął od użytkownika cele, zaplanował sposób ich osiągnięcia, a następnie zrealizował te plany. Sercem całej pętli przetwarzania była sekwencja operacji. W tym przypadku inteligencja robota jest funkcjonalnie rozkładana na ścisły ciąg operacji. Centralnym punktem tego poglądu na inteligencję jest wewnętrzny model świata, który należy rozszerzać, utrzymywać i stale się do niego odwoływać, aby zdecydować, co robić dalej. W przypadku Shakeya, podobnie jak w większości ówczesnej sztucznej inteligencji, model świata został zdefiniowany w kategoriach logiki formalnej. Robot otrzymał wstępny zestaw aksjomatów, a następnie wykorzystano procedury percepcyjne do zbudowania i zmodyfikowania modelu świata w oparciu o informacje sensoryczne, zwłaszcza z systemu wizyjnego robota. Plany opracowywano przy użyciu systemu STRIPS, który stał się bardzo wpływowym i pomógł rozwinąć dziedzinę planowania sztucznej inteligencji. Po wykonaniu każdej akcji, nadrzędny system sterowania PLANEX wykonywał najkrótszą podsekwencję planu, która doprowadziła do celu i której warunki wstępne zostały spełnione. Jeśli nie zastosowano żadnej podsekwencji, PLANEX wywołał STRIPS, aby sporządzić nowy plan. Ten proces może być obliczeniowo bardzo kosztowny, nawet w starannie skonstruowanych środowiskach, w których działał robot (składały się one głównie z dużych kolorowych bloków o różnych regularnych kształtach i rozmiarach). Jednakże podejście ogólne wywarło duży wpływ i dominowało przez ponad dekadę, w którym to czasie poszczególne funkcje stawały się odrębnymi specjalizacjami, które zaczęły tracić ze sobą kontakt. Jednakże, chociaż Shakey i podobne roboty były sterowane przez komputery wielkości pokoju, wymagania zastosowanego przez nich modelu przetwarzania sekwencyjnego uniemożliwiały działanie w czasie rzeczywistym. Wykonanie pojedynczego zadania, takiego jak poruszanie się po pokoju z omijaniem przeszkód, często zajmowało im dziesiątki minut, a nawet godzin. W połowie lat 80. wielu czołowych badaczy z głównych ośrodków robotyki AI było coraz bardziej rozczarowanych tym podejściem. Hans Moravec, wpływowy robotyk, który wykonał ważną pracę nad Stanford Cart –

projektem podobnym w duchu i podejściu do Shakeya firmy SRI i który powstawał mniej więcej w tym samym czasie, podsumował te odczucia:

Przez ostatnie piętnaście lat pracowałem z robotami mobilnymi sterowanymi przez duże programy, które pobierają określoną ilość danych i analizują je przez sekundy, minuty, a nawet godziny. Choć ich osiągnięcia są czasami imponujące, są kruche – jeśli którykolwiek z wielu kluczowych etapów nie zadziała zgodnie z planem, cały proces prawdopodobnie zakończy się niepowodzeniem i nie da się go naprawić.

(Moravec 1987)

Moravec dalej wskazuje, jak dziwnie kontrastuje to z pionierską pracą Graya Waltera i projektami, które zainspirowały jego żółwie; proste czujniki takich wczesnych robotów były połączone z silnikami za pomocą dość skromnych obwodów, a mimo to potrafiły zachowywać się bardzo kompetentnie i „udawały sobie wybrnąć z wielu bardzo trudnych i zagmatwanych sytuacji” bez marnowania nadmiernej ilości czasu na „myślenie”. Podsumowując, Moravec opowiada się za jak najbardziej efektywnym wykorzystaniem wszelkich dostępnych obecnie technologii w celu stopniowego dokonywania odkryć eksperymentalnych, zamiast opracowywać coraz bardziej złożone systemy rozumowania, których nie można wykorzystać w żaden znaczący sposób w czasie rzeczywistym w prawdziwym świecie.

Robotyka oparta na zachowaniu i inspirowana biologią

Dominujące podejście do rozkładu funkcjonalnego opisane w poprzedniej sekcji było ściśle powiązane z ogólną filozofią, która panowała wówczas w większości sztucznej inteligencji. Główny nurt był opiekunami zasadniczo kartezjańskiego poglądu na to, czym jest sztuczna inteligencja i jak należy ją praktykować: inteligencję należy w dużej mierze rozumieć w kategoriach manipulowania starannie skonstruowanymi wewnętrznymi modelami rzeczywistości zewnętrznej; stąd poszukiwania inteligentnych maszyn powinny koncentrować się na sposobach budowania modeli świata i rozwoju algorytmów pozwalających „wnioskować” o świecie za pomocą tych modeli. W połowie lat 80. takie podejście zaczęło słabnąć w wielu obszarach sztucznej inteligencji, nie tylko w robotyce. Rozczarowanie takim stanem rzeczy znalazło szczególnie skuteczny głos u Rodneya Brooksa, który rozwijał alternatywną wizję nie tylko inteligentnej robotyki, ale także ogólnego problemu sztucznej inteligencji. Pod wpływem Moraveca, a także niekonwencjonalnej pracy Marca Raiberta (który wyprodukował wspaniałą serię robotów na nogach), Brooks wraz ze swoim zespołem z MIT stał się centralnym punktem rosnącej grupy dysydentów, którzy wystrzelili salwę ataków na główny nurt sztucznej inteligencji. W posunięciu, które przywołało ducha cybernetyki, dysydenci odrzucili założenia establishmentu i zamiast tego utrzymywali, że większa część naturalnej inteligencji jest ściśle powiązana z generowaniem zachowań adaptacyjnych w trudnych, bezlitosnych środowiskach, w których żyje większość zwierząt. Badanie kompletnych autonomicznych systemów sensomotorycznych – „sztucznych stworzeń” – uznano za najbardziej owocną drogę naprzód, zamiast opracowywania bezcielesnych algorytmów do abstrakcyjnego rozwiązywania problemów, na czym skupiała się wówczas większość sztucznej inteligencji. Centralny układ nerwowy był postrzegany jako fantastycznie wyrafinowany system kontroli, a nie komputer do gry w szachy. Dlatego twierdzono, że rozwój mobilnych robotów autonomicznych powinien być absolutnie kluczowy dla sztucznej inteligencji. Zagrożono partykularnym interesom, wzmagały się emocje, wymieniano obelgi. To był ekscytujący czas! U podstaw podejścia Brooksa leżała idea dekompozycji behawioralnej, w przeciwieństwie do tradycyjnej dekompozycji funkcjonalnej. Ogólna architektura sterowania obejmuje koordynację kilku luźno powiązanych systemów generujących zachowania, z których wszystkie działają równolegle.

Każdy z nich ma dostęp do czujników i elementów wykonawczych i może działać jako samodzielny system sterowania. Każdą warstwę postrzegano jako poziom kompetencji, z prostszymi kompetencjami na dole rozkładu pionowego, a bardziej złożonymi na górze (Brooks 1986). Brooks opracował konkretną realizację idei, którą nazwał architekturą subsumcji (Brooks 1986, 1999). Warstwy wyższego poziomu są w stanie przejąć rolę niższych poziomów, przejmując kontrolę nad mocą swoich silników. Architekturę można podzielić na dowolnym poziomie, przy czym niższe warstwy zawsze tworzą kompletny system sterowania. Każda warstwa miała swoje własne sprzężenie czujnik-silnik, które mogło znacznie różnić się od pozostałych, na przykład przy użyciu zupełnie innych czujników i/lub elementów wykonawczych. Pomysł polegał na umożliwieniu podniesienia ogólnych kompetencji poprzez dodanie nowych warstw generujących zachowania bez konieczności zmiany niższych poziomów. Warstwy zbudowano z sieci prostych jednostek przetwarzających, co nadało systemom charakter znacznie bliższy sieciom neuronowym niż klasyczna sztuczna inteligencja oparta na logice i zwykle obejmowały ściśle powiązane sensomotoryczne pętle sprzężenia zwrotnego przechodzące przez środowisko. Cała koncepcja została zainspirowana biologią, a w szczególności neuroetologią bezkręgowców (nauką o zachowaniu w odniesieniu do leżących u jego podstaw mechanizmów neuronowych), przybliżając ją do cybernetycznych korzeni sztucznej inteligencji; duch oryginalnej roboty Graya Waltera w końcu powrócił. Wykazano, że takie podejście skutecznie radzi sobie z wieloma celami i można je w naturalny sposób rozszerzać – czyli obszary, w których tradycyjne metody nie dawały sobie rady. Zespół Brooksa zademonstrował architekturę szeregu autonomicznych robotów mobilnych, w tym maszyn kroczących na nogach, z różnymi kompetencjami, które sięgały co najmniej połowy rozkładu. W dwóch prowokacyjnie zatytułowanych i bardzo wpływowych artykułach „Inteligencja bez reprezentacji” i „Inteligencja bez powodu” Brooks szczegółowo skrytykował podejście klasyczne i wyjaśnił, że monolityczna reprezentacja i podejścia głodne rozumowania nie są dobrym rozwiązaniem. Już jedyna gra w mieście. Pokazując, jak dobrze zaprojektowane równoległe warstwy behawioralne mogą generować spójne ogólne zachowanie w hałaśliwym otoczeniu, zespół z MIT pokazał, że złożone modele świata wewnętrznego nie są konieczne, przynajmniej w przypadku całego zakresu zachowań nawigacyjnych i eksploracyjnych. „Świat jest swoim najlepszym modelem” – to jedno z ich haseł, które oznacza, że system może wydobywać wszystkie istotne informacje bezpośrednio z samego świata, bez konieczności budowania modeli i manipulowania nimi. Praca Brooksa zapoczątkowała powstanie silnego do dziś ruchu tzw. „Nowej AI”. Koncentrując się na rozwoju całych sztucznych stworzeń jako ważnym sposobie pogłębienia naszej wiedzy o naturalnej inteligencji i zapewnieniu nowych kierunków w zakresie inżynierii inteligentnych maszyn, dzięki programowi robotyka ponownie znalazła się na czele sztucznej inteligencji. Pomimo ich sukcesu, po pewnym czasie Brooks znudził się robotami przypominającymi owady i zapragnął spróbować czegoś znacznie wspanialszego i ambitniejszego – humanoidalnego robota, który w znaczący sposób wchodziłby w interakcję z ludźmi i przedmiotami codziennego użytku i który miałby coś zbliżonego do ludzkiego poziomu możliwości. Tak narodził się projekt Cog. Robot (Cog) składał się z tułowia z ramionami i głowy wyposażonej w wzrok, przykręconej do ławki. Przyjęto podejście ogólnie oparte na zachowaniu, chociaż indywidualne kompetencje były obecnie często bardziej złożone i nie opierały się już na prostych implementacjach sieciowych, a interakcje między zachowaniami mogły być bardziej zaangażowane (np. nie tylko proste operacje hamowania). Dokonano interesujących osiągnięć w inżynierii robotów (np. w siłownikach przypominających mięśnie) i generowaniu zachowań. Jednak niewielu twierdziłoby, że wykazano ogólne kompetencje na poziomie ludzkim. Efektem projektu była eksplozja zainteresowania robotyką humanoidalną i rozwój interakcji społecznych jako ważnego obszaru badań w dziedzinie robotyki. Dzięki swojej pracy nad projektem Cog Cynthia Breazeal, wówczas studentka w laboratorium AI MIT, była pionierką koncepcji robota, który mógłby angażować się w interakcje społeczne. Opracowała Kismet, który zainspirował konstrukcję wielu podobnych robotów w laboratoriach na całym świecie. Kismet ma mikrofony w uszach i kamery ukryte za ludzkimi

gałkami ocznymi. Może poruszać oczami i szyją, a także wykonywać mimikę dzięki możliwości otwierania szczęki oraz poruszania uszami, brwiami i ustami. Oprócz wzroku i słuchu robot może komunikować się za pomocą mowy. Robot Breazeal został opracowany do etapu, w którym jest w stanie wchodzić w interakcję w przekonujący sposób, wykazując się i reagując na nastrój i emocje. Oprócz wskazania przyszłości robotów przeznaczonych do interakcji z ludźmi, projekt otworzył także możliwość wykorzystania robotów jako narzędzi do badania i lepszego zrozumienia niektórych rodzajów interakcji społecznych. Eksplozja robotyki inspirowanej biologią, którą pomogły prace Brooksa, zaowocowała wieloma interesującymi nurtami badań, z których wiele jest nadal bardzo aktywnych, i znacznie zbliżyła sztuczną inteligencję do biologii, zwłaszcza neuronauki, niż to miało miejsce przez wiele lat. W miarę jak ograniczenia tradycyjnej sztucznej inteligencji stały się coraz bardziej oczywiste, na pierwszy plan wysunęły się inne obszary inspirowane biologią, takie jak sieci neuronowe, systemy adaptacyjne, sztuczna ewolucja i sztuczne życie. Te różne nurty zmieszały się z podejściem do robotyki „nowej sztucznej inteligencji”, tworząc nowe postawy i kierunki. Oblicze AI uległo radykalnej zmianie. W tym rozdziale nie ma wystarczająco dużo miejsca, aby omówić szeroki zakres robotyki inspirowanej biologią, dlatego skoncentruje się on na dwóch ważnych i wpływowych obszarach: robotyce ewolucyjnej i inspirowanym przez owady podejściu do nawigacji wizualnej.

Robotyka ewolucyjna

Artykuł Alana Turinga (1950) pt. „Maszyny obliczeniowe i inteligencja” jest powszechnie uważany za jedno z przełomowych dzieł dotyczących sztucznej inteligencji. Najbardziej znany jest z tak zwanego testu Turinga – propozycji oceny, czy maszyna jest inteligentna. Jednak ukryta pod koniec szeroko zakrojonej dyskusji Turinga na temat kwestii wynikających z testu jest znacznie bardziej interesującą propozycją. Sugeruje, że wartościowe inteligentne maszyny powinny być adaptacyjne – powinny uczyć się i rozwijać – ale przyznaje, że ręczne projektowanie, budowanie i programowanie takich maszyn jest prawdopodobnie całkowicie niewykonalne. Następnie szkicuje alternatywny sposób tworzenia maszyn w oparciu o sztuczny analog ewolucji biologicznej. Każda maszyna miałaby materiał dziedziczny kodujący jej strukturę, a zmutowane kopie tworzyłyby maszyny potomne. Zastosowano by mechanizm selekcji faworyzujący lepiej przystosowane maszyny – w tym przypadku te, które nauczyły się zachowywać najbardziej inteligentnie. Turing zaproponował, że mechanizm selekcji powinien w dużej mierze składać się z oceny eksperymentatora. Minęło ponad czterdzieści lat, zanim dawno zapomniane sugestie Turinga stały się rzeczywistością. Opierając się na rozwoju podstawowych algorytmów wyszukiwania ewolucyjnego (Holland 1975), badacze z Krajowej Rady ds. Badań Naukowych (CNR) w Rzymie, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Uniwersytetu w Sussex i Case Western University niezależnie zademonstrowali metodologie i techniki praktyczne rozwijać, a nie projektować systemy sterowania dla prymitywnych inteligentnych maszyn. To właśnie w porywającym środowisku „Nowej AI” na początku lat 90. narodziła się dziedzina robotyki ewolucyjnej. Początkowe motywacje były podobne do motywów Turinga: ręczne projektowanie inteligentnych maszyn adaptacyjnych przeznaczonych do pracy w środowiskach naturalnych jest niezwykle trudne – czy możliwe byłoby całkowite lub częściowe zautomatyzowanie tego procesu? Od początku zdecydowana większość prac w tym obszarze dotyczyła populacji sztucznych genomów (list znaków i liczb) kodujących strukturę i inne właściwości sztucznych sieci neuronowych sterujących autonomicznymi robotami mobilnymi, których zadaniem jest wykonanie określonego zadania lub przedstawienie jakiś zestaw zachowań. Inne właściwości robota, takie jak układ czujników czy morfologia ciała, również mogą być pod kontrolą genetyczną. Genomy ulegają mutacjom i krzyżowaniu się, tworząc nowe generacje robotów zgodnie ze schematem darwinowskim, w którym najsilniejsze osobniki mają największe szanse na splotzenie potomstwa. Sprawność mierzy się na podstawie tego, jak dobrze zachowuje się robot zgodnie z pewnymi kryteriami oceny; jest to zwykle mierzone automatycznie, ale może, w sposób osiemnastowiecznych hodowców świń i zgodnie z pierwotną propozycją Turinga, opierać się na

bezpośredniej ocenie eksperymentatorów. Prace nad robotyką ewolucyjną są obecnie prowadzone w wielu laboratoriach na całym świecie i opublikowano liczne artykuły na temat wielu aspektów tej dziedziny.

Potencjalne zalety tej metodologii obejmują:

- * Możliwość eksploracji potencjalnie nieograniczonych projektów, które mają dużą liczbę wolnych zmiennych. Kodowanie genetyczne definiuje całą klasę projektów robotów. Oznacza to, że przy określaniu wykonalnego rozwiązania potrzeba mniej założeń i ograniczeń. Algorytm ewolucyjny przeszukuje tę klasę systemów pod kątem odpowiednich projektów.
- * Możliwość wykorzystania metodologii do dostrojenia parametrów już udanego projektu – być może w celu wykorzystania go w nowej aplikacji.
- * Możliwość, poprzez staranne zaprojektowanie kryteriów przydatności i technik selekcji, uwzględnienia wielu i potencjalnie sprzecznych kryteriów projektowych i ograniczeń (np. wydajności, kosztów, wagi, zużycia energii itp.).
- * Możliwość opracowania bardzo niekonwencjonalnych i minimalistycznych projektów.

Wybitnymi wczesnymi ośrodkami badawczymi w tej dziedzinie były EPFL i Uniwersytet Sussex, które nadal są bardzo aktywne w tej dziedzinie. Wiele wczesnych prac EPFL wykorzystywało miniaturowego robota Khepera (Mondada, Franzi i Lenne 1994), który stał się powszechnym narzędziem w wielu obszarach badań robotyki. Przy średnicy 55 mm i wysokości 30 mm w podstawowej konfiguracji jest wyposażony w osiem czujników zbliżeniowych na podczerwień – sześć z przodu i dwa z tyłu – które mogą również działać jako detektory światła widzialnego. Posiada dwa niezależnie napędzane koła, co pozwala na szybkie manewrowanie. W pierwszych udanych eksperymentach z robotami ewolucyjnymi w EPFL wykorzystano populację ciągów bitów kodujących wagi połączeń i progi węzłów dla prostej sieci neuronowej ze sprzężeniem zwrotnym o stałej architekturze. Każdy członek populacji został zdekodowany w konkretną instancję kontrolera sieci neuronowej, która została następnie załadowana do robota. Sterowało to robotem przez określony czas, gdy poruszał się po prostym środowisku ze ścianami obwodowymi i centralną ścianą ukośną, która działała jak przeszkoda, wokół której roboty musiały się poruszać. Do ewolucji zachowań związanych z unikaniem przeszkód wykorzystano następującą prostą funkcję sprawności:

$$F = V + (1 - \sqrt{DV}) + (1 - I)$$

gdzie V to średnia prędkość obrotowa przeciwnych kół, DV to różnica pomiędzy znakowanymi wartościami prędkości przeciwnych kół, I to wartość aktywacji czujnika podczerwieni o najwyższym wejściu (odczyty są wysokie, jeśli przeszkoda znajduje się blisko czujnika). Maksymalizacja tej funkcji zapewnia dużą prędkość, tendencję do poruszania się po linii prostej oraz omijanie ścian i przeszkód w otoczeniu. Po około trzydziestu sześciu godzinach ewolucji w świecie rzeczywistym przy użyciu tej konfiguracji opracowano kontrolery, które z powodzeniem generowały efektywny ruch po torze, unikając kolizji ze ścianami. W tym samym czasie, gdy prace były prowadzone w EPFL, na Uniwersytecie Sussex prowadzono serię pionierskich eksperymentów nad ewolucją zachowań kierowanych wzrokowo, w których nawracające zaburzenia nerwowe kontrolery sieciowe i morfologie próbkowania wizualnego były jednocześnie rozwijane, aby umożliwić robotowi bramowemu (a także innym, bardziej standardowym robotom mobilnym) wykonywanie różnych zadań kierowanych wizualnie. Morfologia próbkowania wizualnego określała, które części obrazu z kamery robota zostały wykorzystane jako dane wejściowe do kontrolera sieci neuronowej. Liczba, rozmiar i położenie małych (wejściowych) fragmentów obrazu zostały określone genetycznie, reszta obrazu została wyrzucona. Wczesną wersję

robota bramowego Sussex pokazano na rysunku 13.8b. Kamera skierowana jest w dół, w stronę lustra ustawionego pod kątem 45 stopni. Lustro może obracać się wokół osi prostopadłej do płaszczyzny obrazu kamery. Kamera jest zawieszona na suwnicy, umożliwiając ruch w wymiarach X, Y i Z. W praktyce zapewnia to odpowiednik robota kołowego z kamerą skierowaną do przodu, gdy używane są tylko wymiary translacji X i Y. Dodatkowy wymiar umożliwia badanie zachowań podczas lotu. Urządzenie było początkowo używane w sposób podobny do opisanej wcześniej konfiguracji robotów ewolucyjnych EPFL w świecie rzeczywistym. Populacja ciągów kodujących sterowniki robotów i morfologie wykrywania wizualnego jest przechowywana na komputerze i pobierana pojedynczo do robota. Dokładne położenie i orientację głowicy kamery można dokładnie śledzić i wykorzystywać w ocenie sprawności. Udało się osiągnąć szereg zachowań nawigacyjnych sterowanych wizualnie, w tym omijanie przeszkód i rozróżnianie różnych obiektów. W eksperymencie pokazanym na rysunku 13.8b, zaczynając od losowej pozycji i orientacji, robot musiał poruszać się w kierunku trójkąta, a nie prostokąta. Należało to osiągnąć niezależnie od względnego położenia kształtów i w bardzo hałaśliwych warunkach oświetleniowych. Opracowano niezwykle minimalne systemy, które wykorzystywały tylko dwa lub trzy piksele informacji wizualnej, a mimo to były w stanie bardzo solidnie wykonać zadanie w bardzo zmiennych warunkach oświetleniowych. Od czasu tych wczesnych prac udało się wyewoluować ogromną różnorodność zachowań. Nie ma wystarczająco dużo miejsca, aby przedstawić odpowiednie podsumowanie całego obszaru, dlatego poniżej wyróżniono kilka interesujących podobszarów (więcej informacji można znaleźć w „Dalsza lektura”). Od połowy lat 90. XX wieku wzmagają się prace nad ewolucją sterowników dla różnego rodzaju robotów kroczących – co jest nietrywialnym zadaniem koordynacji sensomotorycznej. Prawdopodobnie pierwszym sukcesem w tym kierunku byli Lewis, Fagg i Solidum (1992), którzy opracowali kontroler neuronowy dla prostego robota sześciopodowego. Robot był w stanie sprawnie poruszać się na statywie po płaskich powierzchniach. Wszystkie oceny przeprowadzono na rzeczywistym robocie, z każdą nogą podłączoną do własnej pary sprzężonych neuronów, przy czym ruch nogi napędzany jest przez jeden neuron, a unoszenie nogi przez drugi. Te pary neuronów połączono krzyżowo w sposób podobny do zastosowanego w architekturze neuronowej, aby umożliwić koordynację między nogami. Ta architektura lokomocji, wprowadzona przez Beera, opierała się na badaniach karaluchów i od tego czasu często stosuje się jej uogólnienia i rozszerzenia. Gallagher i inni wykorzystali jego ogólną wersję do opracowania sterowników umożliwiających generowanie ruchu u symulowanego sztucznego owada. Kontrolery zostały później pomyślnie załadowane do prawdziwego robota sześciopodowego. Maszyna ta była bardziej złożona niż maszyna Lewisa i innych, z większą liczbą stopni swobody na nogę. W tej pracy każda noga była kontrolowana przez w pełni połączoną sieć pięciu neuronów, z których każdy otrzymywał ważony sygnał czuciowy z czujnika kąta tej nogi. Wagi połączeń i parametry neuronów były pod kontrolą genetyczną. Zapewniło to wydajne chody na statywie do chodzenia po płaskich powierzchniach. Aby zapewnić szerszy zakres chodów przy różnych prędkościach, aby można było z powodzeniem pokonywać trudniejszy teren, bardziej skuteczna okazała się nieco inna rozproszona architektura, inspirowana badaniami na patyczkowatych owadach.

Jakobi (1998) z powodzeniem wykorzystał swoje techniki minimalnej symulacji (ultraszybkie, ultracienkie symulacje wykorzystujące wiele poziomów hałasu), aby opracować sterowniki dla robota ośmionóżnego. Ewolucja w symulacji trwała niecałe dwie godziny na czymś, co dziś można by uznać za bardzo powolny komputer, a następnie została pomyślnie przeniesiona do prawdziwego robota. Jakobi opracował modułowe sterowniki oparte na powtarzalnej architekturze sieci Beera, aby kontrolować robota podczas poruszania się po otoczeniu, unikania przeszkód i poszukiwania celów. Robot potrafił płynnie zmieniać chód, poruszać się do przodu i do tyłu, a nawet obracać się w miejscu. Niedawno podobne podejścia z powodzeniem zastosowano do opracowania sterowników dla bardziej wyrafinowanych mechanicznie robotów, takich jak Sony Aibo. Niedawno przeprowadzono również

udane prace nad ewolucją kontrolerów neuronowych dla wysoce niestabilnego problemu dynamicznego chodzenia na dwóch nogach. Te i podobne badania wykazały, że ewolucyjny rozwój sterowników sieci neuronowych, charakteryzujących się ich skomplikowaną dynamiką, generalnie zapewnia szerszy zakres chodów i płynniejszą, bardziej adaptacyjną lokomocję niż w przypadku bardziej tradycyjnych metod. Wczesne badania nad pojedynczym robotem wkrótce zostały rozszerzone, aby uwzględnić interakcje między wieloma robotami. Floreano i Nolfi przeprowadzili pionierskie prace nad koewolucją zachowań drapieżników i ofiar u fizycznych robotów. Sprawność robota-drapieżnika mierzono na podstawie szybkości, z jaką złapał ofiarę; o przydatności ofiary zdecydowano na podstawie tego, jak długo unikała drapieżnika. W eksperymencie wykorzystano dwa roboty Khepera. Każdy miał standardowy zestaw czujników zbliżeniowych, ale drapieżnik miał także system wizyjny, dzięki czemu ofiara była w stanie poruszać się dwa razy szybciej niż drapieżnik. Pojawiła się seria interesujących strategii pościgu i unikania. Później Quinn i inni wykazali ewolucję skoordynowanego zachowanie polegające na współpracy w grupie robotów. Powstała grupa identycznych robotów wyposażonych jedynie w czujniki zbliżeniowe na podczerwień wymagane jest przesunięcie się jak najdalej w skoordynowanej grupie, zaczynając od losowej konfiguracji. Analiza najlepiej opracowanego rozwiązania wykazała, że obejmowało to roboty przyjmujące różne role, przy czym roboty wspólnie „decydowały”, który robot będzie pełnił każdą rolę.

W opisanych dotychczas pracach można było dostrzec przeważającą tendencję do rozwijania systemów sterowania dla istniejących wcześniej robotów: mózg jest ograniczony, aby dopasować się do konkretnego ciała i zestawu czujników. Oczywiście w naturze układ nerwowy ewoluował jednocześnie z resztą organizmu. Dzięki temu układ nerwowy jest wysoce zintegrowany z aparatem zmysłów i resztą ciała: całość funkcjonuje w sposób harmonijny i zrównoważony, nie ma wyraźnych granic pomiędzy systemem sterowania, sensorami i ciałem. Chociaż od samego początku badań nad robotyką ewolucyjną uznawano ograniczenia wynikające z braku możliwości genetycznej kontroli morfologii ciała, istniały poważne trudności techniczne w ich przezwyciężeniu, więc kwestię tę nieco odsunięto na bok. Różni badacze opowiadali się za wykorzystaniem w pełni ewolucyjnego sprzętu do opracowania nie tylko obwodów sterujących robotem, ale także planu jego nadwozia, który może obejmować typy, liczbę i położenie czujników, rozmiar korpusu, promień koła, właściwości siłownika i tak dalej. Należy jednakże podejść do tej w dużej mierze ograniczonej dyskusji teoretycznej, aż do pracy Lipsona i Pollacka nad projektem Golem. Pracując na Uniwersytecie Brandeis, Lipson i Pollack popchnęli koncepcję w pełni ewolucyjnego sprzętu robotycznego tak daleko, jak było to wówczas rozsądnie wykonalne technologicznie. Autonomiczne „istoty” wyewoluowały w symulacji z podstawowych elementów składowych (neuronów, prętów, siłowników). Pręty można łączyć ze sobą, tworząc dowolne konstrukcje kratownicowe z możliwością stosowania zarówno sztywnych, jak i przegubowych podkonstrukcji. Neurony można było łączyć ze sobą oraz z prętami, których długość można było regulować za pomocą siłownika liniowego. Tak zdefiniowane maszyny miały za zadanie przemieścić się jak najdalej w ograniczonym czasie. Następnie przy użyciu robota, przy użyciu technologii szybkiej produkcji (trójwymiarowy druk metodą wytłaczania tworzyw sztucznych), wytworzono najlepiej przystosowane osobniki. W ten sposób zespół uzyskał autonomię w projektowaniu i konstruowaniu, wykorzystując ewolucję w symulacji fizycznej „ograniczonego wszechświata” w połączeniu z automatyczną produkcją. Zrealizowane w ten sposób wysoce niekonwencjonalne projekty sprawdziły się zarówno w rzeczywistości, jak i w symulacji. Sukces tych prac wskazuje drogę do nowych możliwości w opracowywaniu energooszczędnych, odpornych na awarie maszyn. Obecnie zakres robotyki ewolucyjnej rozszerzył się, obejmując obiecujące nowe prace nad autonomicznymi maszynami latającymi, a także badania mające na celu zbadanie konkretnych zagadnień naukowych, takich jak zasady z neurologii lub pytania z nauk kognitywnych.

Nawigacja inspirowana owadami

W przeciwieństwie do obecnych sztucznych systemów, owady uczą się wzrokowo poruszać w złożonym środowisku w niezwykle niewielu próbach i wykorzystują wzrok do wykonywania wielu szybkich i skomplikowanych manewrów. Biorąc pod uwagę ich stosunkowo małe zasoby neuronowe, należy kłaść nacisk na wykorzystywanie wrodzonych zachowań i wydajnych metod przetwarzania w celu wzmocnienia takich zdolności. Badania z zakresu neuroetologii i zachowań owadów zaczęły ujawniać pewne szczegóły stosowanych sprytnych strategii, odkrywając w ten sposób potencjalnie bogaty pokład inspiracji dla wysoce wydajnych, a jednocześnie solidnych algorytmów robotów. Jeden z ważnych nurtów inspirowanych owadami metod nawigacji wizualnej dla robotów wywodzi się z obliczeniowego modelu „migawki” Cartwrighta i Colletta (1983), opracowanego w celu uwzględnienia zdolności mrówek i pszczół do odnajdywania drogi do celu za pomocą wskazówek wizualnych. Wykorzystując przypominający owady, dookólny (360 stopni) panoramiczny widok, w którym punkty orientacyjne w otoczeniu można łatwo odróżnić od tła, model działa poprzez obliczenie kierunku ruchu w oparciu o różnicę między bieżącym widokiem a przechowywaną „migawką” widok z pozycji bramkowej. Tę prostą technikę pomyślnie zademonstrowano na mobilnym robocie poruszającym się po pustynnym środowisku, którego punktami orientacyjnymi są bardzo widoczne czarne cylindry. Wykazano, że metoda ta działa dobrze w obszarze wokół bramki, w którym wszystkie punkty orientacyjne były dobrze widoczne. Ściśle powiązaną, a nawet prostszą metodą nawigacji lokalnej jest technika średniego wektora punktu orientacyjnego (ALV). ALV zapewnia rzadką reprezentację bieżącej sceny wizualnej, przetwarzając ją w pojedynczy dwuwymiarowy wektor. Wektor ten jest średnią wektorów jednostkowych wskazujących od środka agenta do każdego z widocznych punktów orientacyjnych. Kierunek kursu jest obliczany na podstawie różnicy pomiędzy bieżącym ALV i ALV w miejscu docelowym. Model ALV jest najskuteczniejszą i pod pewnymi względami najbardziej elegancką metodą naprowadzania na podstawie widoku i wykazano, że zaskakująco dobrze sprawdza się w rzeczywistych środowiskach. Smith i inni rozszerzyli tę technikę do pracy w bardziej złożonych środowiskach na dużą skalę, w których uczenie się tras osiąga się poprzez połączenie lokalnej nawigacji w szeregu mniejszych wizualnych lokalizacji (podśrodków), które są wybierane i uczone przez algorytm. W nowszych pracach przyjęto radykalnie odmienne podejście, opracowując model nawigacji mrówek oparty na znajomości scen. Model stanowi jedyny jak dotąd szczegółowy i kompletny model wyznaczania trasy owadów i może być zastosowany w robotyce. Co więcej, badanie ogólnie pokazuje, że trasy z przewodnikiem wizualnym można tworzyć przy użyciu bardzo oszczędnych mechanizmów, które nie określają, kiedy i czego się uczyć, ani nie dzielą tras na sekwencje punktów orientacyjnych. Innym bardzo przydatnym źródłem inspiracji w zakresie zachowań robotów sterowanych wizualnie jest sposób, w jaki owady wykorzystują informacje o przepływie optycznym. Przepływ optyczny odnosi się do zmieniających się wzorów światła na oku wywołanych ruchem względem otoczenia. Srinivasan i Zhang (1997) badali loty pszczół w tunelach o różnych wzorach na lewej i prawej ścianie. Odkryli, że zwierzęta obierały kurs w dół środka tunelu, omijając ściany, równoważąc przepływ optyczny (szybkość zmiany wzoru) w lewym i prawym polu widzenia. Dla danej prędkości owada, im bliższy jest wzór, tym większy przepływ optyczny po tej stronie. Pozwalało im to nawet pokonywać wąskie przejścia i latać pomiędzy przeszkodami.

Robotyka probabilistyczna

W tej sekcji przedstawiono ważny obszar robotyki, który pojawił się mniej więcej w tym samym czasie, co podejścia oparte na zachowaniu i inspirowane biologią. Chociaż jej metodologia jest głównie uzupełnieniem metodyki stosowanej w tych obszarach, z pewnością wiąże się z nakładającymi się problemami. Tak jak początki robotyki inspirowanej biologią sięgają prac Graya Waltera, tak w dużej mierze niesymboliczne metody leżące u podstaw robotyki probabilistycznej również mają swoje korzenie w cybernetyce. Problem mapowania wymaga, aby robot w okresie eksploracji zbudował reprezentację swojego otoczenia, która może zostać wykorzystana do dokładnej nawigacji.

Powiązany problemem jest lokalizacja – zdolność robota do określenia, gdzie się znajduje na podstawie mapy, na podstawie odczytów czujników. Od początku lat 90. większość prac w tej dziedzinie skupiała się na problemie jednoczesnej lokalizacji i mapowania (SLAM) (Smith, Self i Cheeseman 1990). Wymaga to, aby robot mobilny, umieszczony w nieznanym miejscu w nieznanym środowisku, stopniowo konstruował spójną mapę otoczenia, jednocześnie określając jego lokalizację na mapie. W kwestii tego problemu poczyniono znaczne postępy i dla niektórych typów środowisk znaleziono bardzo dobre rozwiązania. Prawie wszystkie te rozwiązania opierają się na wnioskowaniu probabilistycznym; w rzeczywistości prawdziwy postęp w rozwiązaniu problemu nastąpił dopiero po ujęciu go w kategoriach probabilistycznych. Wszystkie obecne rozwiązania wykorzystują probabilistyczne modele robota i jego otoczenia oraz wszystkie wykorzystują probabilistyczne wnioskowanie przy tworzeniu map na podstawie odczytów czujników robota. Sukces podejścia probabilistycznego wynika z faktu, że problem mapowania jest z natury niepewny, a czujniki robota są hałaśliwe, podobnie jak ruch robota. Podejścia probabilistyczne uwzględniają te cechy problemu, zamiast je ignorować lub próbować je ukryć. Zazwyczaj mapa jest reprezentowana jako zbiór wektorów opisujących lokalizację punktów orientacyjnych wybranych przez system percepcyjny robota. Czasami stosuje się także bardziej złożone mapy metryczne opisujące różne aspekty układu geometrycznego środowiska oraz mapy topologiczne, które reprezentują środowiska pod względem relacji pomiędzy kluczowymi cechami. W ujęciu probabilistycznym problem SLAM wymaga obliczenia następującego rozkładu prawdopodobieństwa dla każdego czasu t :

$$P(x_t | Z^t, U^t, x_0)$$

Jest to warunkowa gęstość prawdopodobieństwa wektora x_t , reprezentującego położenie robota i mapę, biorąc pod uwagę zarejestrowane wejścia czujnika Z^t i elementy sterujące silnika U^t , wraz z początkową pozycją robota x_0 . Z^t i U^t reprezentują wszystkie odczyty czujników i polecenia silnika od chwili $t = 0$ do chwili obecnej. Korzystając z twierdzenia Bayesa, można rozszerzyć to wyrażenie do takiego, które można obliczyć przy użyciu wydajnych procedur rekurencyjnych w każdym kroku czasowym. Metody te przyniosły wymierne sukcesy, w tym nawigację na znacznych dystansach (w 2005 roku zespół Sebastiana Thruna zastosował metody probabilistyczne i wygrał DARPA Grand Challenge na pojazd autonomiczny, który mógł pokonać niećwiczoną trasę o długości 240 km na pustyni Mojave – zob. „Dalsza lektura”). Jednakże nadal istnieją znaczne wyzwania związane ze środowiskami dynamicznymi i, bardziej ogólnie, problemem korespondencji lub powiązania danych (ustalenie, czy odczyty czujników wykonane w różnym czasie odpowiadają tej samej lokalizacji na świecie). Niemniej jednak podejścia probabilistyczne sprawdziły się i zostały uznane za technikę z wyboru w przypadku niektórych rodzajów problemów nawigacyjnych.

Horyzont

W tej części skupiono się na robotyce autonomicznej, w szczególności na podejściach inspirowanych biologią, pokazując, że obszar ten staje się coraz bardziej centralny dla sztucznej inteligencji. Chociaż poczyniono ogromne postępy i większość stale rozprzestrzeniających się robotów mobilnych, które obecnie widzimy w domach (np. autonomiczne odkurzacze i zabawki) lub w takich obszarach, jak eksploracja planet, bezpieczeństwo lub zastosowania wojskowe, korzysta z nowego technik omówionych wcześniej, pozostaje wiele wyzwań. Obecnie możliwe jest wytwarzanie robotów autonomicznych, które zachowują się solidnie i niezawodnie w rzeczywistych środowiskach, angażując się w rzeczywiste zadania w czasie rzeczywistym. Jednakże związane z tym zachowania są nadal stosunkowo proste. Postęp w kierunku bardziej wyrafinowanych zadań, takich jak uczenie się, na czym należy skupić uwagę w złożonym środowisku, koordynowanie wielu sprzecznych celów i popędów, interakcja z innymi robotami w ramach złożonych zachowań grupowych, nauka komunikowania się w

wyrafinowany sposób na temat wykonywanego zadania, i tak dalej. Być może nie powinno to wcale dziwić. Jedną z lekcji, którą większość neuronaukowców rozumiała od wielu dziesięcioleci, a która często była pomijana w przypadku sztucznej inteligencji, jest to, że generowanie inteligentnych, ucieleśnionych zachowań jest niezwykle skomplikowanym problemem. Jednakże dokonuje się postęp i istnieje wiele obiecujących kierunków badań. Jednym z kierunków, krótko wspomnianym wcześniej, który prawdopodobnie będzie zyskiwał na znaczeniu, jest ciągłe zacieranie granicy między mózgiem a ciałem, co tradycyjnie było obecne w badaniach zarówno nad naturalną, jak i sztuczną inteligencją. Tematy poruszone w tym rozdziale są, słusznie, dość dojrzałymi obszarami badań. Istnieje jednak szereg potencjalnie bardzo ważnych nowych dziedzin, które mogą mieć radykalny wpływ w nadchodzących dziesięcioleciach. Należą do nich osiągnięcia w zakresie łączenia elektroniki cyfrowej z tkanką nerwową. Najczęstszą motywacją do takiej pracy jest umożliwienie bezpośredniego sterowania udoskonaloną protetyką przez układ nerwowy. Wskazuje to na możliwość zwiększonego łączenia technologii robotycznej z ludzkimi ciałami – coś, nad czym ostatnio zastanawiało się wiele osób (np. Brooks 2002) i nad czym od dawna eksploruje twórczość Stelarca, radykalnego performerera. Powiązany obszar obejmuje próby wykorzystania wyrafinowanych nieliniowych właściwości adaptacyjnych hodowanych (rzeczywistych) sieci neuronowych do opracowania maszyn hybrydowych (DeMarse i in. 2001), wskazując na możliwość robotów włączających materię biologiczną do swoich systemów sterowania – odzwierciedlając naturę Autorskie roboty teatralne Čapka. Na dłuższą metę tego rodzaju podejście może okazać się skuteczniejsze niż próba zrozumienia systemów biologicznych na tyle szczegółowo, aby móc wyabstrahować ogólne mechanizmy leżące u podstaw generowania inteligentnych zachowań. Badania są jednak na bardzo wczesnym etapie, dlatego nie możemy jeszcze właściwie ocenić ich potencjału. Oprócz ich kluczowej roli w sztucznej inteligencji, roboty autonomiczne są coraz częściej wykorzystywane w przedsięwzięciach artystycznych i twórczych (Wilson 2002) oraz – w rozwoju, który ponownie przenosi nas do Graya Waltera – jako narzędzia do modelowania i badania generowania zachowań w zwierzęta (patrz Dalsza lektura”). Dziedzina ta ogromnie się rozwinęła od czasów, gdy dominowała w niej nieporęczna broń przemysłowa; jest obecnie całkiem możliwe, że w niezbyt odległej przyszłości roboty staną się tak powszechne i powszechne jak obecnie komputery.