



W MNOGOŚCI SIŁA

Na ile podobne są do siebie mrowisko, aglomeracja miejska i mózg? Co odróżnia je od silnika odrzutowego czy komputera? Takie pytania zadają naukowcy zajmujący się modelowaniem układów złożonych. Odpowiedzi mogą mieć nie tylko teoretyczne znaczenie.

➤ ADAM LIPOWSKI, DOROTA LIPOWSKA

WIEKSZOŚĆ URZĄDZEŃ z naszego otoczenia wydaje się bardzo skomplikowana. Samochód, komputer czy ekspres do kawy składają się przecież z dużej liczby precyzyjnie wykonanych i połączonych części. Bez wątplenia ich działanie i konstrukcja wymagały drobiazgowego przemyślenia i nie wyobrażamy sobie, żeby można było zbudować komputer, przypadkowo łącząc jego elementy. Również wymontowanie z niego lub dodanie pojedynczego elementu najprawdopodobniej będzie miało opłakany skutek.

Niektóre układy złożone wydają się jednak odporne na zmiany struktury. Wielogatunkowy ekosystem to przykład takiego układu złożonego. Migracje osobników, rozmnażanie, śmierć, zdobywanie pożywienia, rywalizacja i współpraca między- i wewnątrzgatunkowa to tylko niektóre z procesów, które należy uwzględnić, opisując ewolucję takiego ekosystemu. Nie wątpimy jednak, że przesadzenie lub wycięcie kilku drzew nie spowoduje załamania się funkcjonowania tego układu, a co najwyżej będzie wymagać pewnej jego adaptacji. Mimo złożoności, system jest więc odporny na zmiany: przemieszczenie, usunięcie lub dodanie pewnej liczby tworzących go elementów nie wpływa w istotny sposób na jego funkcjonowanie jako całości. Co więcej, system ten powstał spontanicznie, bez globalnego planu, a jego własności to w dużej mierze konsekwencja oddziaływań między elementami. Układów o podobnych cechach jest wiele, a przykładami mogą być mózg, aglomeracja miejska, rynek finansowy czy internet.

Agenty – cegiełki złożoności

Rośliny, zwierzęta czy ludzie jako elementy składowe układów złożonych są również obiektami niezmiernie skomplikowanymi. Jednak aby móc analizować zachowanie się



Zabawny – ale i zastanawiający – jest fakt, że opisując te zaledwie kilkubitowe strategie, trudno nie doszukać się w nich podobieństw do tak „ludzkich” pojęć, jak pamiętliwość, uprzejmość, podejrzliwość czy szczodrość. Czyżby istnienie takich analogii oznaczało, że cechy te zostały w nas wbudowane ewolucyjnie w wyniku prostych interakcji społecznych, których istotnym składnikiem była szeroko rozumiana opłacalność?

W przypadku człowieka problem ten wydaje się bardziej złożony. Pewne eksperymenty pokazują, że przeżywamy silne poczucie sprawiedliwości i mamy skłonność do nagradzania i karania zachowań innych ludzi nawet wówczas, gdy jest to dla nas nieopłacalne. Ewolucyoniści jednak i to potrafią wytłumaczyć. Otóż na wczesnym etapie rozwoju cywilizacji ludzkiej, gdy panujące warunki były bardzo surowe, największe szanse na przetrwanie miały tylko te grupy, które wytworzyły silne mechanizmy karania i nagradzania swoich pobratymców. Czy więc dodanie kilku kolejnych bitów wystarczy, żeby agent był zdolny do rezygnacji z własnych zysków tylko po to, by ukarać niezbyt uprzejmego agenta, o którym na dodatek wie, że na pewno nigdy więcej go nie spotka? Człowiekowi taka rezygnacja przychodzi w każdym razie z łatwością.

Ewolucja języka

Jednym z najważniejszych kroków na drodze ewolucyjnej człowieka było wynalezienie języka. Ten długotrwały proces, który miał zarówno biologiczne, jak i kulturowe podłoże, ciągle kryje zagadki. Gdzie i kiedy powstał język? Czy powstał tylko raz, następnie rozprzestrzenił się i zróżnicował, czy też pojawił się w wielu miejscach niezależnie? Dlaczego wyrazy składają się z kilku fonemów i jaka jest rola gramatyki? Interesujące są również procesy wymiarowania języków; wydają się tu istnieć podobieństwa do wymiarowania gatunków. Niektóre z tych zagadnień mogą być badane za pomocą układów agentów.

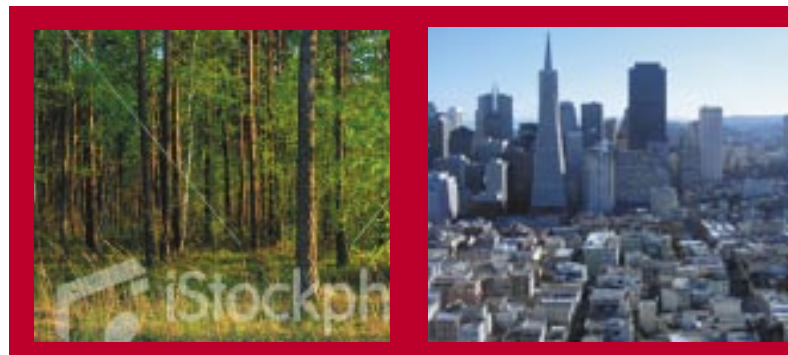
Gry, które w tym przypadku rozgrywają agenty, imitują pewne procesy językowe, na przykład formowanie się wspólnego dla danej grupy agentów nazewnictwa. Agenty komunikują się z użyciem dostępnych każdemu z nich słów. Jeśli mówca używa słowa znanego słuchaczowi, jest to odpowiednio nagradzany sukces komunikacyjny. Symulacje pokazują, że zwykle agenty dochodzą do uzgodnienia słownictwa, a proces ten jest szczególnie szybki w grupach sąsiadujących agentów. W odległych od siebie grupach ❏

takich układów, rozpatruje się tylko uproszczone analogie tych elementów składowych, zwane agentami. Nieosobowa odmiana podkreśla, że agenty to tylko twory matematyczne, a ich stosunkowo proste własności umożliwiają wykonywanie obliczeń numerycznych dla układów składających się z setek lub tysięcy takich elementów.

We wspomnianych modelach ekosystemów agenty reprezentują organizmy biologiczne. W często analizowanym dwugatunkowym ekosystemie mamy tylko dwa rodzaje agentów: drapieżniki i ich ofiary. Reguły ewolucji takiego modelu odzwierciedlają rzeczywiste oddziaływania: aby przeżyć, drapieżniki muszą zjadać ofiary, oba gatunki rozmnażają się w dogodnych do tego warunkach oraz migrują. Mimo prostoty model przejawia typowe dla takich układów zachowania, np. oscylujące zmiany liczebności drapieżników i ofiar. W badaniach ekosystemów wykorzystuje się również bardziej złożone modele, np. uwzględniające większą liczbę gatunków, połączonych w złożone łańcuchy pokarmowe lub mogących ewoluować.

Współpraca i dylemat więźnia

Inną dziedziną, w której symulacje układów agentów mają zastosowanie, jest socjologia. Często analizowanym zagadnieniem jest pojawianie się współpracy i postaw altruistycznych w społeczeństwie. Przy sporadycznych kontaktach między osobnikami zachowania takie zwykle nie są opłacalne, lecz częste interakcje mogą prowadzić do preferowania kooperacji. W modelach tych zjawisk bada się grupę agentów rozgrywających między sobą tzw. dylemat więźnia. To matematyczna gra, ilustrująca istotę problemu: kierować się dobrem ogółu i współpracować czy też próbować oszukać i zagarnąć jak najwięcej dla siebie. Agenty mają indywidualne preferencje rozgrywania tego dylematu, potrafią też dostosować się do zagrań przeciwnika.



Ekosystem nie powstał na bazie globalnego planu. Przemieszczenie, dodanie bądź usunięcie pewnej grupy zwierząt lub roślin na ogół nie zaburzy jego działania. Podobne własności mają mózg, system immunologiczny, aglomeracja miejska, rynek finansowy czy internet.

- ✘ agentów uzgodnione nazewnictwo zwykle jest różne, jeżeli jednak dopuścimy do rozmów między grupami, agenty staną się dwujęzyczne: będą używać głównie języka właściwego ich grupie, ale znany im będzie również język międzygrupowy. Przy częstej komunikacji międzygrupowej *lingua franca* zyskuje na znaczeniu i może wyprzeć język lokalny. Charakterystyczna dla ostatnich lat intensyfikacja komunikacji międzygrupowej (globalizacja, internet)



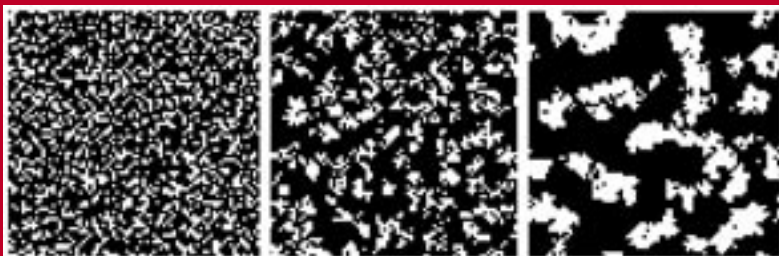
Działanie i budowa elektronicznego detektora, zegarka czy procesora wymagają szczegółowego planu. Każdy element jest precyzyjnie dopasowany do całości i odgrywa określoną rolę. Nawet drobna modyfikacja powoduje, że zwykle urządzenia te przestają działać.

z pewnością nie przypadkiem zbiega się więc z alarmującym tempem wymierania języków.

Ilość przechodzi w jakość

Oscylacje w populacjach drapieżników i ofiar, nawiązywanie współpracy czy ustanawianie wspólnego nazewnictwa to własności emergentne, będące efektem oddziaływania między agentami. Często własności te to nowe jakości, niebędące cechami pojedynczych agentów. Przykładem może być tworzenie zgrupowań przez na pozór beładnie poruszające się termity. Dążność do spontanicznego tworzenia takich struktur jest silna – to wyłącznie konsekwencja oddziaływań między agentami, które nie mają planu i z których żaden nie sprawuje kontroli nad całością.

Istnienie własności emergentnych oznacza, że ekosystem to coś więcej niż zbiór roślin i zwierząt, a społeczeństwo to nie to samo, co grupa ludzi. Oddziaływania między tworzącymi je jednostkami nadają im nowe cechy i powodują, że filozoficzna całość staje się czymś więcej niż zwykłą sumą części. Oprócz wyłaniających się struktur lub



Wyłanianie się struktur można prześledzić na przykładzie grupy termitów przenoszących drewnianka (białe piksele). Termit, który znalazł drewnianko, niesie je w losowo wybranym kierunku. Gdy napotka inne drewnianko, upuszcza to, które niósł, i kontynuuje spacer w przypadkowym kierunku. Z początkowo równomiernie rozłożonych drewnienek tworzą się z czasem coraz większe zgrupowania, mimo iż nie wydaje się to być prostą konsekwencją reguł poruszania się termitów.

procesów, w układach bardziej złożonych agentów możliwe jest też nabywanie samokontroli lub adaptacji całego układu. Być może życie czy świadomość to również cechy emergentne, które można będzie symulować w układach agentów imitujących biomolekuły lub neurony.

Immunologia internetu

Nasze rozumienie zachowania się żyroskopu, przepływającej cieczy czy układów atomowych ma solidne podstawy, gdyż znamy reguły rządzące tymi układami: prawa dynamiki Newtona, hydrodynamiki czy mechaniki kwantowej. Niestety, nie znamy podobnych praw dla układów złożonych, takich jak ekosystemy, rynki ekonomiczne czy społeczności ludzkie. Niewykluczone, że prawa takie nie istnieją. Niektóre układy złożone wykazują jednak intrygujące podobieństwa, sugerujące istnienie pewnych ogólnych prawidłowości rządzących ich zachowaniem. Przykładem jest prawo Omoriego, które opisuje czasowy zanik wstrząsów wtórnych, a któremu wydają się podlegać trzęsienia ziemi, fluktuacje na giełdzie, jak i zaburzenia działania internetu. Poszukiwanie podobnych praw i próby dalszego zrozumienia otaczających nas układów złożonych to z pewnością jeden z powodów wzrastającego zainteresowania naukowców z wielu dziedzin układami agentów.

Zrozumienie zasad działania układów agentów pomoże nam również tworzyć nowe układy złożone i je wykorzystywać. Jeśli przyroda spontanicznie tworzy układy zdolne do samokontroli, nauki czy adaptacji, może wystarczy ją tylko naśladować? Naukowcy nie mają zamiaru ignorować miliardów lat doświadczeń Matki Natury. Opracowują plany internetu, którego odporność na ataki hakerów i awarie gwarantować będzie konstrukcja zbliżona do naszego systemu immunologicznego – z rozproszonym sterowaniem, automatycznym usuwaniem uszkodzeń oraz zdolnością do adaptacji. Pracują nad inteligentnymi materiałami, w których oddziaływania między budującymi je elementami (agentami) w zależności od panujących warunków określać będą ich własności emergentne, takie jak kształt, elastyczność, możliwości sensoryczne czy obliczeniowe. Powstająca na styku nanotechnologii, biologii i robotyki tzw. biologia syntetyczna to również ważny powód zainteresowania układami agentów. Ale zanim wyposażymy agenty w nadmierną autonomiczność, dobrze wiedzieć, że może to mieć także niepożądane skutki, na przykład takie, jak wielki krach na nowojorskiej giełdzie w 1987 roku. Przyczyny tego krachu nie są jasne, jednak niektórzy dopatrują się ich właśnie w niekontrolowanym współdziałaniu wirtualnych brokerów, obracających papierami wartościowymi.

Doświadczenie i teoria to dwa fundamenty badań naukowych. Symulacje komputerowe wydają się ich hybrydą: bazują na dobrze zdefiniowanych modelach teoretycznych, jednak wyniki, których dostarczają, muszą być analizowane w sposób analogiczny do danych eksperymentalnych. Być może właśnie ta trzecia droga badania świata pozwoli zgłębić tajemnice układów złożonych. ✘

✘ **PROF. DR HAB. ADAM LIPOWSKI** pracuje w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu.

✘ **DR DOROTA LIPOWSKA** pracuje w Instytucie Językoznawstwa Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu.