



Игры РАЗУМА

По материалам беседы
с Константином Анохиным

Разум возник
в процессе
эволюции как
инструмент
адаптации
организмов
к меняющейся
непредсказуемой
среде, как умение
выбирать цели,
оптимальный
образ действий,
способность
к обучению
и формированию
представлений

Исследователи, начавшие заниматься проблемой искусственного интеллекта, были оптимистами. Им казалось, что недалек тот час, когда будет сконструирована умная машина, которая не только научится играть в крестики-нолики или шахматы, но и сможет мыслить как человек. Однако с тех пор прошло почти полвека, а мы по-прежнему далеки от этой цели. Но ученые не оставили попыток создать искусственный разум.

Чем концепция старого доброго искусственного интеллекта отличается от современных разработок? Чем искусственный интеллект отличается от естественного? Как создаются и эволюционируют искусственные организмы? Как научить виртуальное существо адаптироваться к внешним обстоятельствам? Что дает исследователям изучение сложных систем на разных уровнях организации? Как организовано мышление человека? Может ли модель суперсознания зародиться в Интернете?

Ответы на эти и ряд других вопросов узнали телезрители программы «Очевидное-невероятное» из беседы профессора Сергея Петровича Капицы с доктором медицинских наук, профессором, членом-корреспондентом РАН, руководителем отдела системогенеза Института нормальной физиологии им. П.К. Анохина РАН Константином Владимировичем Анохиным. Но кое-что осталось за кадром.

Старый добрый искусственный интеллект

Герберт Саймон (Herbert A. Simon), американский ученый, лауреат Нобелевской премии и один из отцов искусственного интеллекта (ИИ) в 1957 г. утверждал, что через десять лет логические машины смогут обыгрывать в шахматы чемпиона мира, разрабатывать и доказывать новые математические теоремы и даже сочинять музыку.

Увы, надежды, возлагавшиеся на старый добрый искусственный интеллект (на Западе его так и называют — *Good Old Fashioned Artificial Intelligence, GOFAl*), не оправдались. Оказалось, что различные приложения классического искусственного интеллекта (КИИ), многочисленные программы, в том числе играющие в шахматы, с трудом адаптируются к динамическим меняющимся условиям. Поэтому в 1980–90 гг. концепции КИИ подверглись серьезной критике.

Исследователям КИИ казалось, что, пользуясь формальными правилами логики, генерируя синтаксис, создавая логический язык (он получил название «менталез»), можно перейти на более высокий уровень понимания принципов интеллекта. При этом предполагалось, что не имеет значения, на каком субстрате (механическом или органическом) будет создана такая логическая машина. Однако оказалось, что системы, основанные на данных принципах, хотя и работали, но плохо справлялись со сложными адаптивными задачами. По-видимому, обратная разработка (*reverse engineering*), осуществить которую стремились представители школы КИИ, упускала какие-то важные особенности естественного интеллекта. Постепенно стало ясно, что при попытках реконструировать алгоритмы интеллекта и создать на этой основе искусственный продукт, исследователи не учитывали, что разум впервые появился вовсе не у человека, а развился как следствие постепенно усложнявшегося адаптивного поведения в процессе эволюции.

Слоны не играют в шахматы

В конце 1980-х гг. некоторые исследователи начали искать новые подходы к искусственному интеллекту, предполагающие эволюционное моделирование. Молодой американский специалист в области ИИ Родни Брукс (Rodney Brooks) написал ►



Рис. 1. Искусственный подводный мир, созданный в работах группы Деметрия Терзопулоса. Акула и рыбки наделены модельной нервной системой, обучающейся адаптивному поведению в непредсказуемых условиях

в 1986 г. манифест, призывающий искать более гибкие и естественные решения, базирующихся на понимании биологии и поведения животных. В статье «Слоны не играют в шахматы» он утверждал, что разум, которым наделены многие существа, даже те, что обладают примитивной нервной системой, возник как инструмент адаптации обладающих телом организмов к меняющейся непредсказуемой среде. Интеллект складывался в процессе эволюции как умение выбирать цели и оптимальный образ действий, как способность к обучению и формированию представлений, вписывающих организм в динамические условия жизни. Кроме того, разум при рождении еще очень прост: щенок не эквивалентен взрослой собаке, а ребенок — зрелому человеку, поскольку значительная часть их жизни посвящена процессам самоорганизации интеллекта и поведения.

Виртуальный подводный мир

В середине 1990-х гг. известный канадский специалист в области компьютерного моделирования Деметрий Терзопулос (Demetri Terzopoulos) создал виртуальный трехмерный подводный мир. Конструкция напоминает океана-

риум, за тем лишь исключением, что в нем вместо живых акул и скатов плавают виртуальные рыбы, способные эволюционировать. Изначально была смоделирована лишь биомеханика, т.е. элементарные возможности движения и сокращения мышц. А координировать движения и плавать искусственные агенты должны были научиться самостоятельно.

Например, восемь новорожденных виртуальных тигровых акул выстраиваются в ряд. Сначала у них, как у младенцев, наблюдаются лишь беспорядочные движения. Через несколько часов работы суперкомпьютера одна из рыб находит среди возможностей своей нервной системы комбинацию импульсов, позволяющую совершать поступательные движения. Спустя несколько дней все акулята научились быстро плавать, освоили повороты, а затем стали и охотиться.

В искусственном океане происходили и другие чудеса. Так, виртуальная популяция рыб собиралась в стаю, каждая особь следовала за другой, и вели они себя как вполне реальный косяк. Но порой искусственные организмы преподносят сюрпризы. Например, электронный скат не пожелал плавать так же, как его биологический собрат. Самостоятельно освоив азы координации, он выработал способы движения, не свойственные настоящим рыбам. Эволюционируя, такие агенты могут научиться самым неожиданным вещам, следовательно, алгоритмы самоорганизации способны упорядочиваться автоматически.

Уроки эволюции

Говоря о соотношении врожденного и приобретенного знания, австрийский ученый, лауреат Нобелевской премии Конрад Лоренц (Konrad Lorenz) задавался вопросом: «Почему в мире живых организмов обучение практически всегда приводит к адаптации?»

По-видимому, отвечал он, должен существовать некий изначально заложенный механизм, позволяющий организму быстро научиться принимать оптимальные решения. Например, ребенок, мгновенно понимает, что нельзя трогать горячий чайник. Значит, в ходе индивидуального развития нервная система должна сформироваться таким образом, чтобы любая новая ситуация получала правильную для выживания оценку и тем самым достигалась адаптивность. Т.е. саморазвитие индивидуума основано на сформированных предыдущей эволюцией представлениях о том, что для него хорошо и что плохо, что опасно и безопасно и т.д.

Следовательно, чтобы искусственный интеллект был «настоящим», он должен так же, как и естественный, обладать способностью к самообучению и самоорганизации. Современные исследователи искусственного интеллекта стремятся разработать устройства, которые будут иметь не только способность к обучению и соответствующие инструменты, но и систему выработанных ценностей, а также исходный репертуар простых форм поведения, опираясь на которые они смогут оценивать ситуации и адаптироваться к ним.

Эти требования имеют прямое отношение к вопросу, может ли искусственный разум зародиться в Интернете. Специалисты скептически относятся к такой возможности, считая, что во всемирной паутине нет соответствующих предпосылок, свойственных адаптивной биологической самоорганизации.

Родни Брукс считает, что автономным роботам нужно тело, определенные органы чувств и умение быстро приспосабливаться к окружающей среде. У них должны быть эволюционно сложившиеся системы врожденного поведения, на котором может строиться дальнейшее обучение и поведение. Эксперименты с такими искусственными агентами

будут стимулировать появление новых идей, проливающих свет на принципы адаптивности.

Аниматы

Попытки моделировать адаптивное поведение предпринимались еще в 50-е гг. XX в., но из-за увлечения классическим искусственным интеллектом не получили развития. Правда, справедливости ради стоит упомянуть появившуюся в 60–70 гг. прошлого столетия теорию адаптивных автоматов М.Л. Цетлина, исследования по проекту «Животное» М.М. Бонгарда и ряд других работ. К данному направлению вернулись лишь в конце 1980-х гг., когда многие специалисты по ИИ стали разрабатывать пластичные, быстро работающие компьютерные модели или роботов, которые, в отличие от КИИ, не имели изначально заложенной картины мира и приспосабливались к среде с помощью набора элементарных поведенческих модулей. Основной задачей подобных опытов было конструирование и исследование искусственных организмов (будь то компьютерная программа или робот), способных самостоятельно адаптироваться к внешним обстоятельствам. При этом планы, цели, схемы поведения не закладываются изначально: новые качества возникают самопроизвольно в результате адаптивного поведения. Такие системы были названы «аниматами» (от англ. *animal* — животное и *automat* — автономно действующее устройство) и получили известность после состоявшейся в 1990 г. в Париже конференции «Симуляция адаптивного поведения: от животных к аниматам». В конечном своем воплощении аниматы представляют собой автономные существа или модельные агенты, которые способны существовать в меняющейся среде так же, как любые живые организмы. Если удастся смоделировать работу нервной системы таким образом,

что она сможет приспосабливаться к окружающей среде и проявлять активность, то в ней могут появиться предпосылки к самоорганизации. При понимании принципов действия примитивной нервной системы впоследствии ученые смогут, во-первых, вывести некие фундаментальные схемы, которые могут быть использованы на следующих этапах разработки искусственного интеллекта; во-вторых, подобная информация поможет биологам постичь тайны устройства более сложного мозга.

Основой для создания роботов могут быть как реальные живые существа, например пауки, осы, крысы и т.д., так и нечто абстрактно-символическое, например оригинальная операционная логика. Но наиболее популярный в наши дни способ создания интеллектуальных машин — искусственная эволюция. Чтобы развитие нервной системы шло в нужном направлении, разработчик должен задать определенный набор примитивных понятий, правила принятия новых решений и критерии отбора. Пионером подобного обучения роботов, основанного на правилах отбора в нервной системе, стал нейробиолог-теоретик, Нобелевский лауреат Джеральд Эдельман, сконструировавший со своими сотрудниками в Калифорнийском институте нейронаук серию подвижных адаптирующихся устройств *NOMAD* (*Neurally Organized Mobile Adaptive Devices*), имеющих родовое имя «Дарвин». Сегодня создано уже четвертое поколение таких систем.

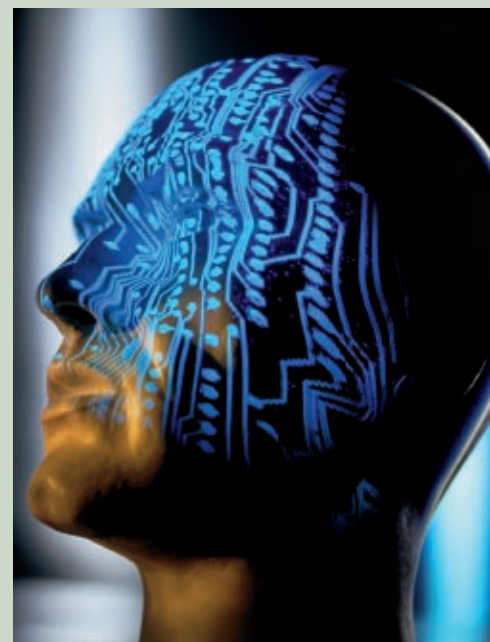
Адаптивное поведение аниматов

Целенаправленно реконструировать принципы адаптивного поведения специалисты по ИИ начали в 90-х гг. XX в. Эти исследования и положили начало разработке моделей аниматов. Сейчас это направление активно развивается, регулярно проводятся конференции ►

ИНТЕРНЕТ

Может ли Всемирная паутина, которая все больше и больше захватывает сознание человека, породить некую супермодель искусственного интеллекта?

Большинство исследователей дают отрицательный ответ. Они придерживаются мнения, что сознание может возникнуть только в активной самостоятельной системе, обладающей некими базисными ценностями. В Интернете накоплен огромный объем информации, существуют возможности интерактивного общения, есть поисковые программы, системы сравнения и корреляции, однако он не имеет собственных мотиваций. Интернет можно рассматривать как слепок с коллективного сознания человечества, но он представляет собой исключительно информационную среду, т.к. не обладает сознанием, пусть даже искусственным, которым наделен мотивированный агент. Для того чтобы в Сети зародился разум, она должна начать совершать самостоятельные поступки, т.е. информационная среда должна превратиться в автономную систему. Пока ничего подобного не наблюдается.



СЕКРЕТЫ КИНО

В 1987 г. американский ученый Крейг Рейнольдс (Craig Reynolds) с помощью компьютера построил модель поведения групп животных. Виртуальные существа следовали установленным правилам, сами собирались в стаи и, не будучи связанными между собой, демонстрировали сложное групповое поведение. Каждое из них должно подчиняться трем правилам: не слишком приближаться к другим особям, двигаться туда же, куда все, и держаться середины стаи. Рейнольдс назвал своих компьютерных зверюшек «бойдами».



Именно они и их близкие родственники стали первыми «разумными» компьютерными персонажами на киноэкране. Некоторые из них «снимались» в ряде эпизодов «Возвращения Бэтмена»: их использовали для моделирования движения стай летучих мышей и пингвинов. Поведенческая анимация применялась также в некоторых кадрах фильмов «Скалолаз» и «От заката до рассвета», в массовых сценах мультфильмов «Король Лев» и «Собор Парижской Богородицы».



Последние достижения в области компьютерного моделирования продемонстрировал фильм «Властелин колец» режиссера Питера Джексона. Многотысячные армии до последнего воина были смоделированы на компьютере. Каждый участник виртуального сражения действовал на экране именно так, как действовали бы реальные люди, а врагов можно было отличить от героев даже по поведению.

Simulation of Adaptive Behavior (From Animals to Animats), издается журнал *Adaptive Behavior*. Исследователи надеются, что на основе анализа эволюции когнитивных способностей животных и с учетом особенностей интеллекта человека им удастся создать действительно умный искусственный организм.

Сегодня идет поиск общих принципов архитектуры адаптивного поведения. Сначала ученые пытались моделировать поведение насекомых — пауков, пчел, ос. Например, в возглавляемой Родни Бруксом (Rodney Brooks) лаборатории искусственного интеллекта Массачусетского технологического института, где изучается широкий спектр интеллектуальных и адаптивных систем, включая создание разумных роботов, было смоделировано самодвижущееся шестиногое 35-сантиметровое насекомое-робот *Genghis*. Оно передвигалось, преодолевало препятствия, адаптировалось к конкретным условиям и принимало самостоятельные решения. Сегодня сотрудниками лаборатории разрабатываются обезьяноподобные и мобильные роботы (*Kismet*, *Coco*) с гораздо более сложным поведенческим репертуаром: предполагается, в частности, что они будут способны к социальным взаимодействиям и эмоциональным реакциям.

В Парижской лаборатории *Animat Lab* работают с искусственным агентом *Hexapod*, напоминающим *Genghis*. Под руководством основателя данного направления Ж.-А. Мейера (J.-A. Meyer) проводятся исследования адаптивного поведения животных и роботов. Предполагается, что система управления анимата может формироваться и модифицироваться посредством обучения, индивидуального развития (онтогенеза) и эволюции. Сегодня в *Animat Lab* разрабатывается проект *Psikharpax* — король крыс. Ученые стремятся создать робота, в котором будет синтезирован

ряд адаптивных механизмов и нервных структур, ответственных за адаптивное поведение и пространственную ориентацию у крыс. Способности электронного зверя будут развиваться за счет «обучения без учителя», т.е. он будет сам строить когнитивную карту среды и вырабатывать адаптивные стратегии поведения, схожие с теми, что использует мозг крысы.

В Англии, в Сассекском университете, работает центр вычислительных нейронаук и роботики (CCNR), также создающий интеллектуальные насекомобразные существа. В этом же университете была предпринята попытка смоделировать эволюцию группового поведения аниматов, а также создать модель «хищник-жертва».

Лаборатория искусственного интеллекта в Цюрихском университете, которой руководит Рольф Пфайфер (Rolf Pfeiffer) разрабатывает подходы понимания природы интеллекта путем его создания (*understanding by building*). Она включает построение моделей биологических систем, исследование общих принципов естественного интеллекта животных и человека, их использование при конструировании роботов и других искусственных интеллектуальных систем.

Лаборатория искусственной жизни и роботики в Римском Институте когнитивных наук и технологий, руководимая Стефано Нолфи (Stefano Nolfi), ведет исследования эволюционной роботики и принципов формирования адаптивного поведения.

Нейробиология когнитивных процессов

Помимо моделирования адаптивного поведения, современных исследователей в области ИИ интересует непосредственное изучение процессов мышления, восприятия и других высших функций мозга. Сложность этой задачи заключается в том, что наш мыслительный



Рис. 2. Эксперименты по проверке способности голубей формировать абстрактные категории, такие как «дерево». Слева — камера в которой голубю показывают слайды содержащие и не содержащие объект изучаемой категории. Голубь должен клевать одну из кнопок, если слайд содержит изображение дерева. За это он получает награду пищей. Справа — два набора слайдов из экспериментов Ричарда Гернштейна — содержащие и не содержащие деревья.

аппарат состоит из около 10^{11} нейронов, которые образуют между собой примерно 10^{14} связей и способны к бесчисленному множеству возможных взаимодействий. Даже если можно было бы описать работу всех клеток мозга человека в любой момент времени, все равно не удастся понять, как же функционирует столь сложный механизм, как возникают мышление, восприятие, психика.

Более того, исследователями установлено, что одни и те же задачи успешно решают нервные системы с совершенно разным строением. Допустим, возьмем вопрос, поставленный еще И.М. Сеченовым: как мозг формирует абстрактные категории? Существующие методы функционального нейрокартирования позволяют сегодня увидеть, какие области человеческого мозга вовлекаются в выработку абстрактных понятий. Но одно их описание не даст ответа на вопрос о фундаментальных принципах процесса категоризации. Серия экспериментов, проведенных американскими психологами Ричардом Гернштейном (Richard Herrnstein) и Джоном Сереллой (John Cerella), показала, что формировать абстрактные категории могут не только люди, но и птицы. Голубям показывали серии

цветных слайдов и награждали их пищей только в том случае, если они касались клювом изображений деревьев. Вскоре птицы научились безошибочно отличать на новых картинках деревья от строений, автомобилей, даже кустарников или, например, от снятой крупным планом ботвы сельдерея (рис. 2). Так удалось выяснить, что, хотя мозг пернатых устроен совсем иначе, чем у высших млекопитающих, и они могут мыслить категориями. А опыты З.А. Зориной и сотрудников кафедры высшей нервной деятельности МГУ продемонстрировали, что некоторые птицы, например вороны, обладают и выраженной способностью к счету. Механизмы категоризации, памяти и преследования определенной цели работают не только у человека и птиц, но и у пчел. Как показал немецкий нейробиолог Рандольф Менцель (Randolf Menzel), пчелы способны запоминать, с каких цветов они уже собрали мед, и к каким направляются, даже если убрать их из поля прямой видимости. А между тем в мозге насекомого в миллион раз меньше нейронов, чем у человека, в нем нет ни одной структуры, похожей на высшие отделы человеческого мозга, отвечающие за рабочую память и концентрацию на поставленной цели. ▶

ПТИЧКА ПЕВЧАЯ

Интерес ученых, исследующих принципы формирования и работы сложных функциональных систем мозга, в последнее время все чаще привлекают пернатые — своим пением. Оказалось, что многие фундаментальные механизмы пения певчих птиц формируются и работают на тех же принципах, что и человеческая речь. И у людей, и у пернатых в процессе эволюции сложились совокупности специализированных нервных структур, образующие функциональные системы, поддерживающие определенную форму поведения. Основы такого поведения в определенном смысле можно считать врожденными. Так, и у певчих птиц, и у человека существуют предпосылки к освоению «языка». Но чтобы овладеть языком, во-первых, требуется учитель, во-вторых, обучение должно происходить в определенные чувствительные периоды в детстве, когда и ребенок, и птенец легко воспринимают новое. Причем в обоих случаях в качестве шаблона для усвоения последующей программы используются врожденные предрасположенности, закладывающиеся при развитии нервной систем и ее связей. Пение птиц открывает окно в мир механизмов самоорганизации функциональных систем, основанных на совершенно ином строении мозга, чем у человека, и, тем не менее, подчиняющихся тем же системным принципам (рис. 3).

Исследованием закономерностей формирования функциональных систем сегодня занимаются междисциплинарные научные группы, в которые входят когнитивные психологи, занимающиеся развитием речи у человека, и специалисты, изучающие механизмы формирования пения у птиц. Плоды их совместной работы могут стать следующим шагом на пути к созданию и эволюции искусственного языка и интеллекта, а также способствовать формированию популяций взаимодействующих агентов, изначально обладающих некоторыми средствами коммуникации с помощью языковых или иных символов, а также способностью развиваться.

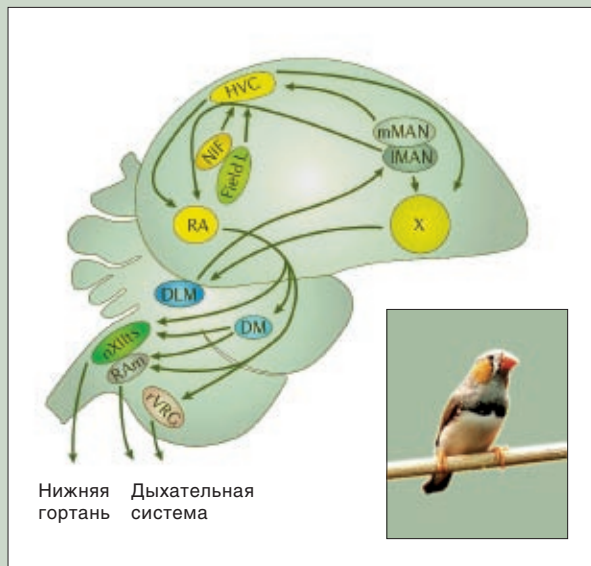


Рис. 3. Схема специализированной функциональной системы пения, сложившейся в ходе эволюции мозга певчих птиц (и отсутствующей у непевчих птиц).

HVC — высший вокальный центр; **NIF** — интерфациальное ядро нидопаллиума; **Field L** — поле L нидопаллиума (слуховой центр); **mMAN** — медиальное крупноклеточное ядро переднего нидопаллиума; **IMAN** — латеральное крупноклеточное ядро переднего нидопаллиума; **X** — область X; **RA** — ядро аркопаллиума; **DLM** — медиальная часть дорзо-латерального ядра таламуса; **DM** — дорзо-медиальная часть интерколликularного ядра среднего мозга; **nXllts** — ядро трахеогортанной ветви XII (подъязычного) черепного нерва; **Ram** — заднеглоточное ядро ствола мозга; **rVRG** — рострально-вентральная группа дыхательных ядер ствола мозга

Нервная система червя *C.elegance*, излюбленного объекта молекулярной генетики развития, состоит всего из 302 нейронов, содержит лишь около 5 тыс. связей, однако и ему присущ достаточно сложный репертуар поведения. Более того, исследования последних лет показали, что червь способен вырабатывать условные рефлексы, используя те же правила, которые И.П. Павлов открыл, изучая собак. Из вышесказанного следует, что фундаментальные свойства интеллекта способны реализоваться у живых существ с самой разнообразной архитектурой нервной системы. Следовательно, для моделирования разумного поведения требуется нахождение тех общих принципов, на основании которых природа создавала когнитивные

способности у организмов с самой разной, часто очень отличающейся от человека нервной системой.

Теория функциональных систем

В поисках биологически обоснованных правил построения ИИ ученые обращаются сегодня к теориям работы мозга, объясняющим устройство естественного интеллекта.

Одна из них — теория функциональных систем (ТФС), созданная в середине XX в. русским физиологом П.К. Анохиным. Она описывает особый слой процессов в мозге, определяющих когнитивные функции и адаптивное поведение человека и животных.

Свойства сознания, психики и разума, как предполагает ТФС, являются

не проявлениями работы тех или иных отдельных зон мозга. Они возникают в результате объединения клеток многих областей в организованные надклеточные структуры, получившие название функциональных систем, поскольку их деятельность тесно связана с выполнением тех или иных функций организма. ТФС призвана понять специфические принципы самоорганизации систем, ведущих к появлению адаптивного поведения со всеми его психологическими атрибутами.

Современные методы нейронаук дают возможность наблюдать в эксперименте за тем, как в мозге образуются такие функциональные системы. Ученые из лаборатории нейрофизиологических основ психики Института психологии РАН

регистрировали работу нервных клеток разных отделов мозга у бодрствующих, свободно передвигающихся животных. Оказалось, что в самых различных областях мозга во время поведения синхронно активируются миллионы нервных клеток, и их совместная активность завершается, когда животное достигает цели. Проведенные эксперименты подтвердили три важнейших положения ТФС: подобные системы должны быть целенаправленными, распределенными (т.е. для достижения общего результата объединяются элементы разных структур) и синхронизованными.

Прозрачный мозг

Мозг, работающий по принципу функциональных систем, бросает серьезный вызов исследователям. Они должны научиться наблюдать за тем, как распределенные по всему мозгу клетки объединяются в системы, решающие те или иные адаптивные задачи. Как найти и увидеть нейроны среди миллионов других клеток мозга, не участвующих в данном поведении? Как понять принципы вовлечения отдельных нейронов в систему и проследить связи разных систем в формирующемся опыте организма? Решение этих вопросов требует новых подходов к изучению мозга, поиски которых ведут исследователи в отделе системогенеза, возглавляемом К.В. Анохиным. Цель их проекта, объединяющего методы нейронаук, молекулярной биологии, физики и компьютерного анализа изображений, — сделать мозг максимально «прозрачным» для исследователя, чтобы можно было воочию увидеть нервные процессы, лежащие в основе формирования и работы сложных функциональных систем.

Один из этих подходов использует гены, активирующиеся в нервных клетках при запоминании новой информации. Специальные молекулярные зонды позволяют ученым выявить нейроны, в которых эти

ЭВОЛЮЦИОННАЯ РОЛЬ МОТИВАЦИЙ

Одна из моделей эволюционного возникновения целенаправленного адаптивного поведения была разработана в Институте прикладной математики Владимиром Редько и Михаилом Бурцевым. Исследователи опирались на общие схемы управления целенаправленным адаптивным поведением, которые рассматриваются в теории функциональных систем (ТФС).

Важную роль в функциональных системах играют мотивации, связанные с потребностями организма. В поведении животных мотивация служит для формирования цели и поддержки целенаправленных форм поведения. Ее можно рассматривать как активную движущую силу, которая стимулирует нахождение решения, адекватного потребностям животного в конкретной ситуации. Например, если организм голоден, он должен искать пищу. Но как на основе этого возникает целенаправленное поведение?

Исследователи рассматривали популяцию агентов, каждый из которых имел определенный энергетический ресурс и естественные потребности в питании и размножении, количественно характеризовавшиеся мотивациями. Существа жили в простой одномерной клеточной среде, где можно было найти пищу. Они увеличивали свой энергетический ресурс за счет питания и расходовали его при совершении действий; если ресурс уменьшался до нуля, агент погибал. Кроме того, искусственные организмы могли скрещиваться и таким образом производить потомство. При малом энергетическом ресурсе преобладала мотивация к питанию, при большом — к размножению. Поведением особей управляла простая нейронная сеть, состоящая всего из 7 нейронов, каждый из которых имел 9 входов, включая специальные входы от мотиваций. На входы поступали сигналы из внешней среды, а выходы нейронов определяли действия искусственных организмов. Вся система управления агентом задавалась 63 числами, определяющими связи между входами и нейронами и составившими геном анимата.

Модель была реализована в виде компьютерной программы. С ее помощью исследовалась эволюция популяции и влияние мотиваций на поведение каждого индивидуума. Для этого отключались входы от мотиваций и проводилось сравнение процессов развития популяций с «работающими» и с «выключенными» мотивациями. Моделирование показало, что эволюция приводит к более высокой численности популяции организмов с мотивациями, чем популяции «немотивированных» собратьев.

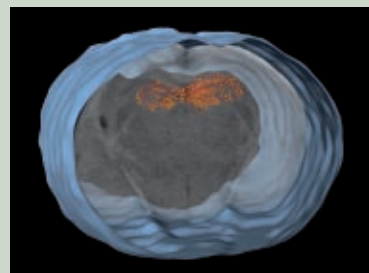


Рис. 5. Трехмерная карта активности генов в мозге животного (справа) обучавшегося находить расположение спрятанной под водой платформы (слева). Оранжевые точки в мозге — нейроны гиппокампа (структуры, отвечающей за формирование памяти), участвующие в запоминании места платформы

ХЕПЕРА

«Хепера» (*Khepera*) — платформа для моделирования нервной системы адаптивных роботов, использующаяся во многих лабораториях. Она может существовать и как модель организма в виртуальной среде, позволяющая наблюдать его эволюцию, и как настоящий робот, который можно снабдить любой моделью нервной системы, создаваемой на компьютере. Можно сказать, что «Хепера» предоставляет свое «тело» для проверки самых разных гипотез эффективности работы искусственного мозга. Робот представляет собой миниатюр-

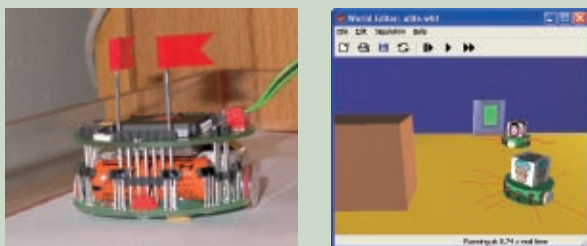


Рис. 4. Робот «Хепера» используемый в экспериментах по моделированию адаптивной нервной системы (слева) и его «двойники» применяемые для моделирования поведения робота в виртуальной среде (справа).

ный шестисантиметровый цилиндр. Он оснащен двумя колесиками, каждое из которых подключено к своему электромотору, что позволяет маневрировать, управляя оборотами каждого из моторов отдельно. Внутри корпуса помещается процессор и микросхема перезаписываемой *flash*-памяти, в которую загружается управляющая программа. Робот «видит мир» при помощи видеокamеры и восьми инфракрасных датчиков, расположенных по периметру. Для регистрации данных в процессе эксперимента механизм может быть подсоединен к компьютеру при помощи кабеля или радиосвязи (рис. 4).

Технические характеристики робота *Khepera II*

- Процессор: *Motorola* 68331, 25 МГц
- RAM: 512 Кбайт
- Flash-память: 512 Кбайт
- Привод: два электромотора постоянного тока
- Скорость передвижения: 2–60 см/с
- Сенсоры: восемь инфракрасных сенсоров радиусом действия 100 мм
- Размеры: диаметр 70 мм, высота 30 мм
- Вес: около 80 г
- Допустимая нагрузка до: 250 г
- Интерфейс: RS-232

гены работают при обучении, а современные методы компьютерного анализа изображений дают возможность реконструировать затем весь «след памяти» в мозге животного (рис. 5). Эти эксперименты показывают, что каждый, даже минимальный эпизод нового опыта, дает импульс к изменению работы генов в миллионах нервных клеток: мозг и во взрослом возрасте никогда не прекращает свои развитие и самоорганизацию. Использование двойных и тройных меток позволяет сегодня исследователям задавать вопросы, как новые функциональные системы образуются и взаимодействуют при формировании адаптивного поведения.

Танцующий робот

В последнее десятилетие моделирование адаптивного поведения аниматов и исследование принципов самоорганизации функциональных систем мозга, обеспечивающих адаптацию у биологических организмов, сближаются. Вместе с исследователями из институтов

прикладной математики и оптико-нейронных технологий РАН, с факультета вычислительной математики и кибернетики (ВМК) МГУ, группа К.В. Анохина работает над новым синтетическим проектом «Мозг анимата». Он посвящен моделированию поведения умных машин на основе принципов работы ФС. В одном из экспериментов анимат, модель робота *Khepera* (Хепера), помещается в ограниченное стенками пространство, где расставлены всевозможные цилиндрические столбики, на некоторых установлены батарейки. Когда запасы энергии истощаются, искусственный агент начинает искать источник питания. Чтобы выжить, он должен научиться отличать стены от предметов, и активные батарейки, излучающие зеленый свет, от разряженных, горящих красным огоньком. Согласно изначальной программе, анимат может подъехать к батарейке, зарядиться и остаться около нее. Однако если он не отправится дальше в поисках нового источника питания, он

«умрет» от голода. Таким образом, робот должен сам научиться тому, что не было заложено в программу (рис. 6). В результате искусственной эволюции один из «питомцев», который прошел путь до 64 поколения (в каждом поколении было по 50 агентов), начал вести себя очень странно. Он вращался вокруг своей оси до тех пор, пока уровень его энергии не падал до критического. Затем автомат подъезжал к ближайшему источнику питания, заряжался и опять начинал крутиться рядом с бесполезной красной батарейкой, вновь теряя силы. Потом он начинал колебаться между двумя источниками, приняв решение, двигался в сторону ближайшего из них, подпитывался и опять начинал «танцевать». Исследователи предположили, что, вращаясь, он осматривается по сторонам, локализуя своим зрением расположенные поблизости источники зеленого света. Поэтому, когда уровень энергии падал ниже критического, он уже знал, куда двигаться, и без промедления направлялся к ближайшему

источнику питания. Предсказать, что такая стратегия возникнет в результате эволюции всего 64 поколений автоматов, было невозможно. Однако подобное происходит регулярно, причем у разных исследователей в самых разных ситуациях. Когда специалисты по моделированию адаптивного поведения создавали нервную систему искусственных агентов даже из небольшого количества клеток и запускали эволюционный цикл, часто возникали абсолютно неожиданные формы приспособительного поведения. «Подопытные» находили совершенно непредсказуемые способы решения своих задач, причем зачастую гораздо более простые, чем могли предвидеть и заложить в программу разработчики.

Все только начинается

Создавая искусственные интеллектуальные системы, ученые получают возможность подсматривать за работой модельных нервных клеток, что пока не удается делать с реальными существами, несмотря на возможности функционального нейромониторинга и других новейших

методов исследования мозга. Даже относительно простые организмы, например, пчелы, улитки, или дрозофилы, обладают нервной системой, состоящей из десятков и сотен тысяч нейронов. Никакие самые современные методы не позволяют одновременно увидеть работу всех этих клеток, не дают возможность наблюдать их взаимосвязи и понять, что происходит с каждым из нервных контактов в момент совершения организмом какого-либо действия. Изучая же поведение искусственных агентов, ученые могут не только отслеживать процесс эволюции и обучения своих агентов, но и видеть, как работает их нервная система в целом, все контакты в ней, каждая клетка. И оказывается, например, что некоторые нервные клетки агентов постепенно начинают специализироваться на тех или иных абстрактных компонентах среды. Они категоризируют предметы или некие действия точно так же, как и человеческий мозг, выполняя определенные задачи, распознает лица или объекты в пространстве. Разрабатываемые сегодня направления (эволюционное

моделирование, изучение адаптивного поведения и работы функциональных систем, исследование высших функций мозга и когнитивных механизмов) могут внести неоценимый вклад в понимание фундаментальных законов и принципов создания как естественного, так и искусственного интеллекта. ■

Тина Катаева

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Анохин П.К. Кибернетика функциональных систем. М.: Медицина, 1998.
- Зорина З.А., Полетаева И.И. Зоопсихология. Элементарное мышление животных. М.: Аспект Пресс, 2003.
- От моделей поведения к искусственному интеллекту. М.: КомКнига, 2006.
- Саймон Г. Науки об искусственном. М.: Мир, 1972.
- Beckoff M. et al. (Eds.) The Cognitive Animal. Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition. The MIT Press: England. 2002.
- Brooks R. Cambrian Intelligence. The Early History of the New AI. The MIT Press: England. 1999.
- Reynolds C.W. Flocks, herds, and schools. Computer Graphics, 1987.

