

4

ПАМЯТЬ

Когда вы читаете книгу, идете по улице, заполненной прохожими, слушаете симфонию, утешаете плачущего ребенка, все органы чувств посылают в ваш головной мозг пространственно-временные сигналы. Окружающий мир — это океан постоянно меняющихся сигналов. Что же происходит с ними при попадании в кору головного мозга?

Еще на заре индустриальной революции ученые рассматривали мозг как своего рода биологический механизм, или программируемый компьютер. Разумеется, никто не сомневался в отсутствии гаек и шурупов в голове человека, но данная метафора представлялась большинству исследователей самой точной.

Как мы отмечали в главе 1, этой позиции придерживались и разработчики искусственного интеллекта. Считалось, что неспособность создать искусственный интеллект напрямую связана с тем, что компьютеры слишком малы и медленны по сравнению с человеческим мозгом. Современный компьютер может считаться эквивалентом мозга букашки, говорили изобретатели, а вот когда мы создадим более быстрые и объемные машины, они будут такими же умными, как человек.

Аналогия между живым мозгом и вычислительной машиной некорректна. По сравнению с транзисторами нейроны головного мозга действуют гораздо медленнее. Нейрон собирает из синапсов входные сигналы, объединяет их и принимает решение. Он либо генерирует им-

пульс — потенциал действия, который будет восприниматься синапсами соседних нейронов, — либо воздерживается от этого. Обычный нейрон может осуществить подобную операцию и вернуться в исходное состояние за пять миллисекунд, т.е. $1/200$ секунды. Современный компьютер на кремниевой основе может осуществлять миллиард операций в секунду. Значит, основная компьютерная операция осуществляется в 5 миллионов раз быстрее, чем базовая операция в человеческом мозге! Каким же образом, вопреки столь существенной разнице, мозг способен действовать быстрее, чем наиболее быстрые цифровые компьютеры? “Да это же очевидно, — скажут сторонники идеи создания вычислительных и управляющих систем по образу и подобию мозга, — мозг — это параллельный компьютер. У него миллиарды клеток, занимающихся одновременным вычислением. Этот параллельный процесс во много раз увеличивает мощность биологического мозга”.

Я считаю данный аргумент заблуждением и готов опровергнуть его при помощи простого эксперимента, так называемого “правила ста шагов”. Человек способен выполнять существенные задания за намного меньший промежуток времени, чем одна секунда. Например, я мог бы показать вам фотографию и спросить, есть ли на снимке кошка. Если вы увидите кошку, а не медведя или луковицу, то должны будете нажать кнопку. Для современного компьютера такая задача является очень сложной или вообще невыполнимой, а человек даст правильный ответ за полсекунды или даже быстрее. Но, поскольку нейроны малоподвижны, это значит, что за полсекунды информация, поступившая в ваш мозг, может пройти цепочку не более чем из сотни нейронов. То есть мозг “вычисляет” ответ за сто шагов или даже меньше, независимо от того, какое количество нейронов вовлечено в процесс передачи информации. С момента, когда ваши глаза фиксируют изображение, и до момента, когда вы нажимаете кнопку, сигналы прошли цепочку из ста нейронов. Цифровой компьютер для решения той же задачи использует около миллиарда шагов. Сотни шагов для компьютера будет недостаточно даже для того, чтобы передвинуть один знак на дисплее, не говоря о более сложных задачах.

Но разве миллионы одновременно работающих нейронов не похожи на параллельный компьютер? Не совсем. Принцип параллельности используется и мозгом, и компьютером, но это все, что их роднит. Параллельные компьютеры объединяют значительное количество быстродействующих компьютеров для выполнения сложных задач, таких как составление прогноза погоды. Чтобы предвидеть погоду, нужно

просчитать физические условия во многих частях планеты одновременно. Каждый компьютер может работать над одной задачей. Но даже если сотни или тысячи машин объединить в параллельную систему, отдельному компьютеру для обработки информации и выполнения своей задачи понадобятся миллиарды или миллионы шагов. Какой большой параллельный компьютер мы бы ни собрали, каким бы быстродействующим он ни был, он не сможет сделать ничего полезного за сто шагов.

Приведу пример: представьте, что я попросил вас перенести сотню каменных глыб через пустыню. За один раз вы можете перенести только один камень, а чтобы пересечь пустыню, вам нужно сделать миллион шагов. Понимая, что справиться с заданием в одиночку будет непросто, вы нанимаете сто рабочих для параллельного выполнения задачи. Дело станет продвигаться в сто раз быстрее, однако тот факт, что для пересечения пустыни нужно пройти миллион шагов, остался неизменным. Наем новых работников, даже тысячи, ничего изменить не может. Независимо от количества нанятых работников задание может быть выполнено только за миллион шагов. То же самое справедливо и для параллельных компьютеров. Добавление дополнительных процессоров не меняет дела. Независимо от количества и мощности процессоров и быстродействия компьютер не может решить сложную задачу за сто шагов.

Но как же мозгу удается решать сложные задачи за сто шагов, в то время как даже самый большой параллельный компьютер ничего подобного сделать не в состоянии за миллион или миллиард шагов? Дело в том, что мозг на самом деле не “вычисляет” решения задач, он извлекает их из памяти, представляющей, по сути, хранилище готовых решений. Соответственно, для того чтобы их извлечь, нужно всего несколько шагов. Медленных нейронов для этого более чем достаточно, ведь они сами и составляют память. Можно утверждать, что мозг, точнее, неокортекс, который является “интеллектуальной” частью мозга, — это единое запоминающее устройство, а вовсе не компьютер.

С вашего позволения, я продемонстрирую разницу между *вычислением* решения и *использованием памяти* для решения задачи. Пусть нашей задачей будет поймать мяч. Кто-то бросает мяч, и он летит прямо на вас. У вас есть меньше секунды, чтобы схватить его еще в воздухе. Задача не ахти какая сложная, но лишь до тех пор, пока вы не захотите запрограммировать на ее выполнение робота. Когда инженеры и разра-

ботчики программного обеспечения берутся за такое задание, они сначала пытаются вычислить траекторию полета мяча и определить его пространственное расположение в момент контакта с рукой. Вычисления требуют использования ряда уравнений, которые можно почерпнуть из курса физики высшей школы. После этого все сгибы руки робота нужно отрегулировать так, чтобы конечность могла занимать определенную позицию. Задание требует составления и решения математических уравнений другого типа, на сей раз более сложных, чем предыдущие. И наконец, всю операцию нужно повторить несколько раз, поскольку по мере приближения мяча робот получает более точную информацию о его положении в пространстве и траектории полета. Если робот начнет движение только после определения точной цели полета мяча, он не успеет его поймать. Робот должен начать движение с целью поймать мяч гораздо раньше, не обладая полной информацией, а потом постоянно корректировать свои действия по мере приближения мяча. И хотя для выполнения этой задачи можно запрограммировать компьютер, для успешного решения ему понадобится миллион шагов. Правило “ста шагов” подскажет нам, что мозг решает эту задачу иначе. Он обращается к памяти.

Как вы поймаете мяч, используя при этом память? В вашем мозге сохраняется память о моторных командах (точно так же, как и многих других типов поведения), необходимых для поимки мяча. Когда бросают мяч, происходят три события. Во-первых, вид мяча автоматически активизирует соответствующие воспоминания. Во-вторых, в памяти оживает временная последовательность моторных команд. В-третьих, вызванное воспоминание соотносится с обстоятельствами конкретной ситуации, т.е. приспосабливается к фактической траектории мяча и положению вашего тела. Воспоминание о том, как нужно ловить мяч, не было запрограммировано в вашем мозге. Вы обучились этому в процессе жизни, соответственно информация не вычисляется, а сохраняется в нейронах коры вашего головного мозга. “Минуточку! — возразите вы, — Каждый бросок отличается от другого. Как было только что сказано, вызванное воспоминание приспосабливается к положению мяча при каждом броске. Разве это не требует решения уравнений — того, чего мы пытались избежать?” На первый взгляд, это действительно так, но природа решила проблему переменных обстоятельств иным, гораздо более совершенным способом.

В этой главе мы увидим, что кора головного мозга создает *инвариантные представления*, которые компенсируют изменчивость ок-

ружающего мира. Представьте, например, что вы садитесь на водную кровать. При этом произвольно перемещаются все расположенные на ней объекты — скажем, подушки и другие люди. Кровать не высчитывает, насколько высоко или низко нужно поднять тот или иной край; функция приспособливания осуществляется автоматически за счет физических свойств воды и поверхности матраца. В следующей главе мы увидим, что структура шестислойной коры головного мозга обладает приблизительно таким же свойством по отношению к поступающему в нее из внешнего мира потоку информации.

Итак, принципы действия неокортекса и компьютера различны. Вместо вычисления решений и программирования поведения кора головного мозга использует память.

У компьютеров тоже есть память в форме жестких накопителей и чипов памяти. Но четыре особенности памяти неокортекса коренным образом отличают ее от памяти компьютера:

- неокортекс запоминает последовательности элементов, а не отдельные элементы окружающего мира;
- неокортекс вспоминает последовательности автоассоциативно;
- неокортекс запоминает последовательности в инвариантной форме;
- неокортекс сохраняет последовательности иерархически.

Первые три принципа мы рассмотрим в данной главе. Концепция иерархичности коры головного мозга была представлена в главе 3, а в главе 6 мы более подробно остановимся на ее прикладном значении.

В следующий раз, рассказывая собеседнику о каком-нибудь происшествии, попробуйте абстрагироваться от происходящего и проанализировать последовательность вашего повествования. Вы не можете рассказать все, что случилось, одновременно, даже если ваша речь будет очень быстрой, а собеседник — внимательным. Вы выдаете порции информации последовательно, одну за другой. Это происходит не только потому, что разговорная речь сама по себе является серийной. Любой рассказ — будь то письменный, устный или рисованный в картинках — всегда носит серийный характер. Это объясняется тем, что память о событиях сохраняется в вашем мозге в серийной форме и может быть извлечена оттуда тоже в серийной форме. Вы не можете вспомнить все, случившееся с вами, одномоментно. Собственно, невозможно думать о чем-то сложном вне рамок серии событий или мыслей.

Некоторые люди в разговорах подолгу не могут перейти к сути. Они топчутся на месте, нагромождая в своем рассказе скучные подробности

и многочисленные отступления от темы. Если вам доводилось общаться с такими собеседниками, то вы наверняка вспомните, насколько раздражает подобная манера повествования. Вам так и хочется крикнуть: “Да скажите же наконец о главном!” Но человек продолжает в деталях описывать хронологию произошедших с ним событий. По-другому у него просто не выходит.

Приведу другой пример. Закройте глаза и представьте свой дом. Вообразите, что вы подходите ко входной двери. Постарайтесь рассмотреть ее во всех подробностях. Откройте ее. Войдите внутрь. Посмотрите налево. Что вы видите? Посмотрите направо. Затем пройдите в ванную комнату. Что вы видите на стене справа от вас? Слева? Что лежит в верхнем правом ящике туалетного столика? Какие еще вещи вы храните в ванной? Вы знаете ответы на эти и тысячи подобных вопросов, вы можете вспомнить их со всеми подробностями. Вся эта информация хранится в коре вашего головного мозга. Можно сказать, что ответы на перечисленные вопросы — часть воспоминания о вашем доме. Но вы не способны думать обо всем сразу. В вашей памяти эта информация действительно связана, но не существует способа, который бы позволил вам увидеть в своем воображении все одновременно. Чтобы вызвать из памяти полное и устойчивое воспоминание о своем доме, вам придется пройти через серию последовательных фрагментов в таком же порядке, как вы их переживали в действительности.

И таковы все воспоминания. Воспоминание об одном эпизоде (приближение к двери) активизирует следующий (войти в дверь), который, в свою очередь, повлечет за собой следующий (подняться или спуститься по лестнице) и так далее. Все это — последовательности, которые вы проходили раньше. Конечно, приложив определенные усилия, можно сменить порядок описания своего дома — скажем, перепрыгнуть от описания входной двери к описанию второго этажа. Но, как только мне вздумается рассказать собеседнику, как выглядит моя комната или любой элемент интерьера, я возвращусь к последовательному способу описания. По-настоящему беспорядочных мыслей вообще не существует. Воспоминания всплывают в памяти путем ассоциирования.

Вы знаете алфавит. Но попробуйте-ка произнести его в обратном порядке и убедитесь, насколько это трудновыполнимая задача. Кроме того, вы на собственном опыте поймете, каково учить алфавит маленькому ребенку. В вашей памяти алфавит представлен как последовательность сигналов. Как и другие воспоминания, данное не является чем-то “законсервированным” в вашем мозге и не поддается моментальному

извлечению или извлечению в произвольном порядке. Точно так же обстоит дело и с днями недели, месяцами в году, вашим номером телефона и множеством другой информации. Запоминание песни — еще один отличный пример временной последовательности. Припомните какой-нибудь известный вам мотив. Скажем, моя любимая песня — *Somewhere over the Rainbow*, а вы выберите другую мелодию по своему вкусу. Вы не сможете вспомнить песню всю сразу, только в последовательности. Вы начнете с начала или с припева, но будете придерживаться определенной последовательности. Вам не удастся припомнить слова в обратном порядке или охватить своим вниманием песню целиком. В реальности прослушивание песни занимало у вас определенный промежуток времени, и вы сможете вспомнить ее только в том порядке, в каком заучили.

То же самое справедливо и для низшего уровня сенсорных запоминаний. Возьмем, к примеру, тактильную память о разных типах поверхностей. В вашем мозге хранятся воспоминания об ощущениях, вызванных касанием к гравию, поглаживанием вельветовой ткани, нажиманием клавиш пианино. Эти запоминания основаны на последовательностях точно так же, как алфавит или песня. Различие в том, что более короткие последовательные ряды тактильных ощущений будут разбиваться на секундные промежутки вместо минутных. Если бы во время вашего сна я поместил бы вашу руку в ведро с гравием, то, проснувшись, вы бы легко определили, к чему прикасается ваша рука, пошевелив пальцами. Ваше воспоминание о тактильном ощущении при касании к гравию основано на последовательности сигналов о вибрации и давлении, воспринимаемых нейронами вашей кожи. Эти последовательности сигналов очень отличаются от тех, которые возникли бы у вас, будь ваша рука зарыта в песок или сухие листья. Скрип и перекатывание гальки, сопровождающее даже самые незначительные движения вашей руки, продуцируют контрольные последовательности сигналов, которые приводят в действие соответствующие воспоминание в соматосенсорной части неокортекса.

В следующий раз, выходя из душа, обратите внимание на то, как вы вытираетесь полотенцем. Однажды я сделал для себя открытие, что всякий раз этот процесс состоит из одних и тех же движений и положений тела. Наблюдая за своей женой (очень приятный эксперимент!), я заметил точно то же. Думаю, в вашем случае результат окажется сходным: вы отметите полужесткую последовательность движений и поворотов тела. Но попробуйте-ка ее изменить! Приложив некоторые усилия, вы

сможете это проделать, но лишь при условии предельной сосредоточенности на своем занятии. Как только отвлечетесь, сразу почувствуете, что вернулись к старой модели поведения.

Все наши воспоминания хранятся в синаптических связях между нейронами. Если учесть, что неокортекс содержит огромное количество информации, но в каждый конкретный момент времени мы можем вспомнить лишь малую ее толику, то можно предположить, что любое воспоминание обеспечивается лишь ограниченным количеством нейронов и синаптических связей между ними. Когда вы начинаете вспоминать об интерьере своего дома, то сначала активизируется один набор нейронов, потом он приводит в действие следующий набор и так далее. Объем памяти неокортекса невероятно вместителен. Тем не менее в каждый конкретный момент времени мы можем погрузиться лишь в несколько воспоминаний, вызываемых лишь как последовательность ассоциаций.

Выполните еще одно задание. Погрузитесь в прошлое и попытайтесь вспомнить места, где вы жили, в которых вам довелось побывать, людей, с которыми вы были знакомы. Оказывается, в процессе такого упражнения в памяти всплывают факты, казалось бы, давно позабытые. Нейронные синапсы хранят тысячи подробнейших воспоминаний, используемых очень редко или не используемых вовсе. В каждое отдельное мгновение мы извлекаем из памяти лишь крошечную часть того, *что* в ней хранится. Большинство же воспоминаний, образно говоря, сидят и бьют баклуши в ожидании сигнала.

Память компьютера не хранит последовательности сигналов. С помощью разных программных доработок можно этого достичь (как, например, в случае сохранения и воспроизведения песни), но память компьютера не способна на автоматическое выполнение такого задания. В то же время запоминание последовательностей символов — это неотъемлемое свойство системы памяти коры головного мозга, данное ей от природы.

А сейчас предлагаю рассмотреть второе ключевое свойство человеческой памяти — ее автоассоциативную природу. В главе 2 мы выяснили, что значение данного термина подразумевает ассоциирование сигналов самих с собой. Автоассоциативная система способна воспроизвести полную последовательность на основе неполной или искаженной входной информации. Последнее касается как пространственных,

так и временных сигналов. Так, заметив, что из-за шторы выглядывают ботинки вашего сына, вы автоматически представите его в полный рост. Вы создали полный образ из неполной информации о нем. Или представьте, что вы увидели человека, ожидающего автобус, но при этом большая часть его тела скрыта от вас кустом. Ваш мозг не растеряется. Хотя глаза увидят только часть целого, перед вами возникнет полный образ. Причем он будет настолько отчетливым и ярким, что вы вряд ли будете отдавать себе отчет в том, что это всего лишь предположение.

Мозг способен дополнять и временные образы. Припомните незначительную подробность из давно минувших событий, и вам на ум придет вся соответствующая последовательность. Марсель Пруст в известном собрании романов, объединенных названием “В поисках утраченного времени” открывает свой первый рассказ воспоминанием о том, как пахнет печенье “Мадлен”, а затем разворачивает повествование на тысячу с лишним страниц. Общаясь в каком-либо шумном месте, мы зачастую не слышим все слова собеседника. Ничего страшного, ведь наш мозг сам дополнит то, *что* он ожидает услышать. Общеизвестно, что мы на самом деле не слышим полностью всех слов, которые воспринимаем. Привычку некоторых людей “читать мысли” собеседника и заканчивать чужие высказывания считают дурным тоном. Но наш мозг поступает подобным образом постоянно, причем, дополняя не только окончания наблюдаемых явлений, но и их начало и середину. Подобная склонность заниматься постоянным додумыванием фактов редко осознается человеком, однако она является фундаментальной характеристикой памяти. В любой момент времени часть может активизировать целое — в этом состоит суть автоассоциативных воспоминаний.

Неокортекс — это сложная биологическая автоассоциативная система памяти. В каждый момент времени каждая функциональная зона зорко бдит, не появились ли на входе знакомые элементы или их фрагменты. Появление в поле вашего зрения знакомого человека мгновенно прервет поток самых глубоких размышлений — ваши мысли переключатся на приятеля. Визуальный сигнал — появление знакомого — заставляет мозг включиться в процесс вспоминания других сигналов, ассоциируемых с ним. Это неизбежно. А после такого внезапного отвлечения внимания мы часто ломаем голову: “Так о чем же я думал?” Обеденный разговор с друзьями тоже протекает в ассоциативных рамках. Скажем, беседа начинается с обсуждения блюд. Вы отмечаете, что такой же салат ваша мать приготовила вам на свадьбу, и это наводит кого-то на воспоминания о его свадьбе, затем о медовом месяце и путешествии в экзоти-

ческую страну, о политических проблемах в той части мира и так далее. Мысли и воспоминания ассоциативно взаимосвязаны — случайностей здесь нет и быть не может. Входные сигналы, поступающие в мозг, автоассоциативны по отношению к самим себе, они дополняют новые модели и автоассоциативно связаны с тем, что произойдет дальше. Такая цепочка воспоминаний называется *мыслью*, и, хотя ее путь не предначертан, полного контроля над ней мы тоже не имеем.

Теперь обратимся к третьей особенности памяти неокортекса— формированию инвариантных представлений. Здесь мы обсудим их общие черты, а в главе 6 поговорим о том, как мозг создает эти модели.

Память компьютера устроена так, чтобы сохранять информацию в максимально неизменном виде. Когда вы копируете программу с компакт-диска, то на жесткий диск вашего компьютера переносится каждый байт информации со 100-процентной точностью. Незначительное расхождение между оригиналом и копией может вызвать фатальный сбой в работе компьютерной программы. Память неокортекса действует иначе. Мозг не запоминает с абсолютной точностью все увиденное, услышанное или почувствованное, причем совершенно не из-за того, что деятельность коры головного мозга или нейронов беспорядочна, что чревато возникновением ошибок. Так происходит потому, что мозг запоминает важные взаимосвязи внешнего мира, а не привязывается к отдельным его элементам. Давайте рассмотрим несколько примеров.

Как упоминалось в главе 2, простейшие автоассоциативные модели создаются учеными уже несколько десятков лет, а мозг, как я только что объяснил, вызывает воспоминания автоассоциативным способом. Тем не менее существует большая разница между автоассоциативными воспоминаниями, реализуемыми в нейронных сетях, и воспоминаниями неокортекса. В искусственных автоассоциативных воспоминаниях не задействованы инвариантные представления, и поэтому в них возможны существенные упущения.

Я могу сохранять в искусственной автоассоциативной памяти множество снимков лиц, состоящих из черно-белых точек. Если вы предъявите лишь часть одного из изображений (например, глаза), то система дополнит недостающие части (такие эксперименты проводились неоднократно). Однако, если каждую точку картинки передвинуть на пять пикселей вправо, то машина не сумеет распознать лицо. Для искусственной автоассоциативной памяти это уже совершенно новая модель,

потому что расположение пикселей в ней не совпадает с исходной моделью. А вы и я без труда опознали бы сдвинутое изображение как одно и то же лицо.

Искусственная автоассоциативная память не в состоянии распознать изображение, если оно было подвергнуто перемещению, ротации, изменению масштаба, какому угодно другому из тысяч возможных превращений. В отличие от нейронных сетей человеческий мозг с легкостью справляется с такой задачей. Так почему же мы воспринимаем факты, явления или обстоятельства как неизменные, если входные сигналы, их описывающие, поменялись или изменились? Давайте рассмотрим еще один пример.

Сейчас, скорее всего, вы держите в руках книгу. Если вы повернете книгу, измените освещение или положение своего тела на стуле, зафиксируете взгляд на разных частях книги, то световые сигналы, попадающие на сетчатку вашего глаза, полностью изменятся. Зрительные сигналы, которые вы получаете, различны в каждое отдельное мгновение. Входные сигналы, поступающие в ваш мозг, не повторились бы ни разу даже в том случае, если бы вы держали книгу в руках на протяжении ста лет. Однако вы ни на миг не усомнитесь, что держите в руках все ту же книгу. Внутренняя модель “этой книги”, которой располагает ваш мозг, не изменяется даже в условиях информационной переменчивости. Такие внутренние репрезентации мозга описывает термин *инвариантная репрезентация*.

Другой пример: представьте лицо своего друга. Вы узнаете его каждый раз при новой встрече. Это происходит менее, чем за одну секунду, независимо от того, находится ли этот человек в двух шагах от вас, в пяти метрах или в противоположном конце комнаты. Когда он рядом, то его образ занимает большую часть сетчатки, а когда он рядом — лишь малую ее часть. Он может стоять к вам лицом, быть повернутым в профиль или под углом. Он может улыбнуться, прищуриться или зевнуть. Вы могли бы увидеть его при ярком дневном свете, в тени или в разноцветных бликах дискотеки. В каждом из перечисленных случаев доля света, попадающего на вашу сетчатку, будет не такой, как в остальных случаях, однако в каждом отдельном случае вы сразу же узнаете друга.

Давайте приподнимем занавес и посмотрим, *что* происходит в вашем мозге, *что* позволяет ему проявлять столь необыкновенные свойства. Экспериментально установлено, что модель деятельности нейронов в зрительной зоне V1 неокортекса, принимающей визуальные стимулы, будет отличаться для каждого положения лица вашего друга. Всякий

раз, когда лицо меняет свое положение или происходит новая фиксация ваших глаз, модель активности нейронов первичной зрительной зоны меняется в соответствии со сменой изображения на вашей сетчатке. Однако если мы проанализируем деятельность ваших клеток в зоне распознавания лиц — функциональной зоне, расположенной на порядок выше V1 в иерархии коры головного мозга, — то обнаружим полную стабильность. Значит, определенная часть нервных клеток зоны распознавания лиц остается активной все то время, пока лицо друга пребывает в поле вашего зрения (или даже до тех пор, пока вы рисуете его в своем воображении), независимо от размеров, положения, ориентации, масштаба и выражения лица. Эта стабильность нервных клеток высших функциональных зон коры головного мозга и является инвариантной репрезентацией.

Описанный процесс кажется настолько примитивным, что его даже трудно назвать задачей. Он происходит так же автоматически, как и дыхание. Мы можем назвать его тривиальным, поскольку не отдаем себе отчет в том, что происходит. В определенном смысле это действительно тривиальный процесс, ведь наш мозг выполняет его очень быстро (вспомните правило “ста шагов”). Однако вопрос о том, как кора головного мозга формирует инвариантные представления, остается одной из загадок, по сей день не разгаданных наукой. “Насколько сложной загадкой?” — спросите вы. “Насколько, — отвечу я, — что ни один ученый из числа обладающих самыми современными исследовательскими инструментами, не смог ее разгадать”. И совсем не по причине отсутствия стараний.

У данной проблемы очень древние корни — о ней говорили еще во времена Платона, т.е. две тысячи триста лет тому назад. Задаваясь вопросом о том, как люди могут мыслить и познавать мир, Платон обратил внимание, что в реальной жизни нет двух одинаковых предметов или людей, и, кроме того, все они всегда несовершенны по своей форме. Например, у вас есть представление о том, что такое правильная окружность, тем не менее в реальной жизни она почти не встречается. Все изображения круга несовершенны. Даже если я начерчу окружность с помощью циркуля, его границы будут обозначены темной линией, в то время как идеальный круг не должен включать никаких утолщений. Как же в таком случае у вас сформировалось представление об идеальной окружности? Возьмем другой пример из повседневной жизни — например, ваше представление о собаке. Любой когда-либо увиденный вами пес отличается от остальных своих собратьев, а кроме того, любой но-

вый взгляд на одну и ту же собаку также неповторим. Соответственно, каждый раз вы видите новую форму. Однако все впечатления о собаках, полученные вами в процессе жизненного опыта, объединились в вашем мозге под общим понятием “собака”, которое остается неизменным. Платон задавался вопросом: как в мире бесконечно меняющихся форм и быстротечных ощущений люди способны усваивать и использовать неизменные представления?

Решением Платона стала его теория форм. Он считал, что наш высший разум связан с трансцендентной суперреальностью, в которой неизменные стабильные идеи (“Формы”, с прописной буквы) существуют в безвременном совершенстве. Наши души приходят из этого мистического места, где они обитают еще до нашего рождения. Именно там, в этом мистическом месте, человеческие души и постигают, что такое Формы. Согласно представлениям Платона, при рождении у нас уже имеются латентные знания о Формах. Обучение и понимание возможны только благодаря тому, что несовершенные формы реального мира напоминают нам соответствующие идеальные Формы. Мы узнаем окружность и собаку, потому что их образы вызывают воспоминания об Окружности и Собаке.

С современной точки зрения теория Платона чересчур эксцентрична, но если отвести пелену метафизики, то становится понятно, что Платон, по сути, имел ввиду инвариантность. Даже называя его систему толкований чудаковатой, мы вынуждены признать, что интуитивное осознание древним мыслителем того, что поставленный вопрос является одним из наиболее важных в понимании природы человека, было попаданием в десятку.

Чтобы у вас не сложилось представление, что инвариантность при- суща только зрительному восприятию, давайте обратимся к другим типам ощущений — например, к тактильному. Когда вы засовываете руку в бардачок вашего автомобиля в поисках солнцезащитных очков, вашим пальцам достаточно прикосновения, чтобы определить, что вы их нашли. Не имеет значения, какая часть руки контактирует с предметом (большой палец, указательный, любая точка другого пальца или вся внутренняя поверхность ладони) и с какой именно его частью (со стеклом, оправой, дужкой, петлей). Для распознавания очков вашему мозгу достаточно одной секунды соприкосновения любой части вашей ладони с любой частью предмета. В каждом случае поток пространственно-

временных сигналов, поступающий от осязательных рецепторов, различен, поскольку задействованы различные зоны вашей кожи, разные части предмета. Тем не менее вы, не раздумывая, возьмете свои очки.

Или же давайте рассмотрим такой пример сенсорно-моторной задачи: вы вставляете ключ в замок зажигания автомобиля. Каждый раз положение вашего сидения, тела, руки немного отличаются, однако вам кажется, что это одно и то же движение, повторяющееся изо дня в день. И все это только потому, что ваш мозг обладает инвариантной репрезентативностью. Создание робота, который проделывал бы ту же операцию, забираясь в машину и вставляя ключ, практически невозможно. Даже заставив робота абсолютно точно воспроизводить одну и ту же позицию и класть ключи точно в то же место и точно так же, как и в предыдущий раз, вы непременно столкнетесь с неразрешимой проблемой: программа будет работать только для одного-единственного автомобиля. Роботы и компьютерные программы, как и искусственная автоассоциативная память, обладают одним и тем же недостатком — вариативные задачи для них неразрешимы.

Еще один интересный пример — ваша подпись. В моторной зоне коры головного мозга, в ее лобной доле, хранится репрезентация вашего автографа. Каждый раз, выводя свою подпись, вы выполняете одну и ту же последовательность действий: и в случаях, когда вы ставите аккуратную подпись, когда даете вычурный автограф в стиле Джона Хэнкока, когда у вас локоть на весу или когда вы держите ручку пальцами ног. Естественно, каждый раз ваша подпись выглядит немного по-другому (особенно в последнем случае). Но, независимо от орудия написания, размеров подписи и комбинации ее частей, для ее написания вы всегда выполняете одну и ту же абстрактную “моторную программу”.

Из данного примера видно, что инвариантная репрезентация в моторной зоне коры головного мозга — это в каком-то отношении зеркальное отражение инвариантной репрезентации в сенсорной зоне коры головного мозга. В сенсорной зоне различные входные сигналы приводят в действие устойчивый набор нейронных клеток, соответствующих определенным абстрактным моделям (в приведенных выше примерах — лицо друга и солнцезащитные очки). В моторной зоне устойчивый набор нейронных клеток, соответствующий абстрактной моторной команде (хватание мяча, начертание подписи), может выразить себя посредством включения множества комбинаций мускульных групп с учетом всех вероятных ограничений. Если в разных зонах коры головного мозга всегда действует один и тот же алгоритм, как предпо-

лагал Маунткастл, то именно такой симметрии между восприятием и действием следовало ожидать.

Давайте вернемся к сенсорной зоне коры головного мозга и рассмотрим последний пример, касающийся восприятия музыки (я часто использую пример с музыкой, потому что он позволяет рассмотреть все аспекты функционирования неокортекса). Инвариантные представления в музыке обеспечивают способность узнавать мелодию, исполненную в разных тональностях. Выбирая тональность, вы автоматически предопределяете остальные ноты мелодии. Любую мелодию можно сыграть в разных тональностях. Это означает, что каждая аранжировка одной и той же мелодии — по сути, совершенно другая последовательность нот! Каждая новая аранжировка стимулирует совершенно разные наборы чувствительных слуховых рецепторов, заставляя разные наборы пространственно-временных сигналов устремляться к слуховой зоне неокортекса. Тем не менее каждый раз вы воспринимаете услышанное как одну и ту же мелодию. Не обладая абсолютным слухом, вы даже не различите два варианта одной и той же песни, исполненной в разных музыкальных тональностях.

Вспомните песню *Somewhere over the Rainbow*. Скорее всего, вы впервые услышали ее в исполнении Джуди Гарланд в фильме *Волшебник страны Оз*, но, не имея совершенного слуха, вы вряд ли вспомните тональность, в которой она была спета. Если я сяду за пианино и исполню эту песню в такой тональности, в которой вы ее никогда не слышали, для вас она прозвучит та же самая песня. Вы даже не заметите, что все ноты отличаются от тех, которые вы слышали когда-то. Это, в свою очередь, означает, что в вашей памяти песня была запечатлена в форме, игнорирующей высоту звука. Память сохраняет важные связующие песни, а не отдельные ноты. В данном случае важными являются соотношение высоты нот и интервалы между ними. Песня *Somewhere over the Rainbow* начинается с верхней октавы, затем снижается на полтона, затем еще на один тон ниже и так далее. Интервальная структура мелодии сохраняется неизменной вне зависимости от того, в какой тональности она исполняется. Ваша способность без затруднений распознать песню в любой тональности указывает на то, что ваш мозг сохранил ее в форме инвариантного по отношению к высоте звуков представления.

Точно так же лицо вашего друга сохраняется в памяти в инвариантной форме, независимо от угла видения. Вы распознаете его лицо на основе относительных измерений, относительных цветов и относительных пропорций, а не на основе того, каким вы его увидели во вторник

за обедом. Между чертами его лица существуют “пространственные интервалы”, подобно тому, как в песне существуют неизменные интервалы между нотами. Его лицо является широким по отношению к его глазам, по отношению к расстоянию между глазами, у него короткий нос. Цвет его глаз и цвет волос остаются приблизительно в одном и том же соотношении при разном освещении, даже когда оно существенно меняется. Запоминая его лицо, вы запоминаете именно эти важные признаки.

По моему мнению, подобная абстрактность форм свойственна всем зонам коры головного мозга, т.е. это общее свойство неокортекса. Воспоминания сохраняются в форме, охватывающей существенные связи между элементами целого, а не преходящие детали. Когда вы видите, чувствуете или слышите что-то, кора вашего головного мозга получает специфические информационные сигналы, которые она сохраняет в инвариантной форме. Именно инвариантная форма хранится в вашем мозге, и именно с ней впоследствии сравниваются новые входные сигналы. Запоминание, припоминание и распознавание — все это происходит на уровне инвариантных форм. Компьютеры на такое не способны.

Все сказанное выше подводит нас к весьма интересному вопросу. В следующей главе я попытаюсь вас убедить, что важнейшей функцией неокортекса является прогнозирование на основе воспоминаний. Но если мозг действительно сохраняет инвариантные формы, то как же он тогда может составлять прогнозы для конкретных случаев? Я хотел бы привести некоторые примеры и предложить возможные варианты их решения.

Представьте себе 1890 год, вы находитесь в небольшом городке на западе и ожидаете свою подружку, которая должна прибыть к вам с востока. Разумеется, вы хотите встретить ее на вокзале, поэтому за несколько недель до даты ее приезда начинаете следить за расписанием прибытия-отправления поездов. Строгого графика не существует, и, по вашим наблюдениям, поезд никогда не прибывает и не отправляется в одно и то же время на протяжении дня. Вам начинает казаться, что вы никак не сможете предвидеть, когда именно приедет ваша подружка. И вдруг вы замечаете определенную закономерность. Поезд с востока прибывает через четыре часа после отправления поезда в сторону востока. Оказывается, четырехчасовой интервал остается постоянным всегда, хотя время отправления и прибытия меняется день ото дня. Наконец наступает день встречи. Вы засекаете время отправления поезда на восток. Ровно

через четыре часа приходите на вокзал и встречаете свою девушку. Это пример задач, с которыми сталкивается неокортекс, и пример того, как он находит их решение.

Внешний мир, который воспринимают ваши органы чувств, не бывает статичным. Он подобен поездам, прибывающим и отправляющимся в разное время суток. Единственный способ, которым человек может познать этот изменчивый мир, — найти инвариантную структуру для переменного потока информации. Однако инвариантная структура сама по себе не является достаточной базой для частных прогнозов. Знания того, что поезд прибывает через четыре часа после отправления состава в обратном направлении, явно недостаточно, чтобы явиться на вокзал вовремя и встретить свою подружку. В каждом конкретном случае мозг сопоставляет инвариантную структуру с текущими данными. Чтобы составить прогноз времени прибытия конкретного поезда, недостаточно вывести правило четырехчасового интервала из расписания прибытия-отправления поездов. Нужно также применить его к точному времени отправления конкретного поезда в восточном направлении.

Когда вы слушаете, как кто-то исполняет знакомую вам мелодию на пианино, ваш мозг прогнозирует следующую ноту еще до того, как она будет сыграна. Воспоминание песни сохраняется в инвариантной форме. Ваша память подсказывает вам следующий интервал, но она не знает, какая конкретно нота будет следующей. Чтобы спрогнозировать следующую ноту, нужно сочетать следующий интервал с последней нотой.

Когда вы видите лицо вашего друга, неокортекс мгновенно восполняет пробелы и прогнозирует детали внешнего вида вашего приятеля в данный момент времени. Он определяет, что это именно те глаза, тот нос, те губы и те волосы. Прогноз неокортекса отличается завидной точностью. Он может предугадать малейшие особенности лица вашего друга, хотя никогда не видел его именно под таким углом или в такой окружающей обстановке. Если вы знаете относительное расстояние между глазами и носом, структуру лица, то вы правильно спрогнозируете, где должны находиться губы. Если вам известно, что в лучах заката кожа вашего друга кажется оранжевой, то вы можете спрогнозировать и цвет его волос. Ваш мозг сочетает инвариантную структуру лица с особенностями непосредственно воспринимаемой ситуации.

Из трех вышеописанных только пример с поездом является аналогией того, что происходит в вашей коре головного мозга. В случаях с мелодией и лицом речь идет о сочетании инвариантных структур и непосредственных сигналов. Это вездесущий процесс, происходящий

во всех без исключения зонах неокортекса. Благодаря ему вы можете составлять прогноз о комнате, в которой сейчас находитесь. Благодаря ему вы можете спрогнозировать не только слова, которые сейчас будут произнесены, но и тон, ударения, а также в какой части комнаты будут произнесены эти слова. Благодаря ему вы в точности знаете, в каком месте ваша нога коснется пола и какие ощущения вызовет подъем на лестничную площадку этажом выше. Благодаря ему вы можете поставить подпись, держа ручку пальцами ноги, или поймать летящий мяч.

Три особенности памяти неокортекса, рассмотренные нами в данной главе (сохранение последовательностей символов, автоассоциативное запоминание, инвариантные представления), являются необходимыми для прогнозирования будущего на основе воспоминаний о прошлом. В следующей главе сосредоточимся на доказательстве того, что сущностью разума является составление прогнозов.