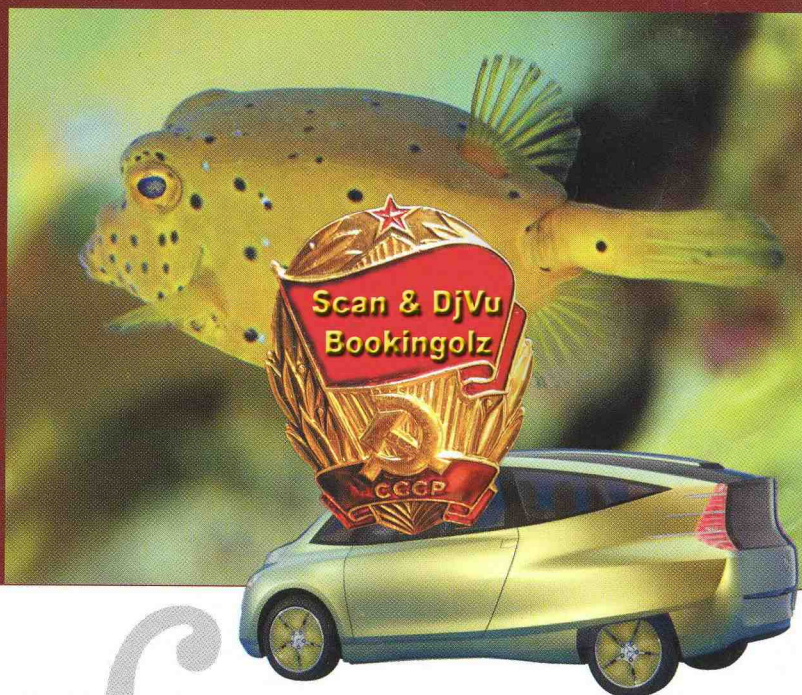


БИОНИКА

Агнес Гийо, Жан-Аркади Мейе



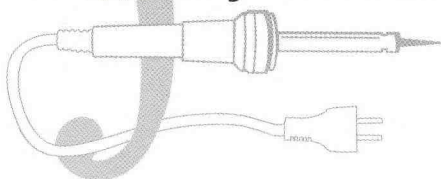
Для кофейников



Агнес Гийо, Жан-Аркади Мейе

Бионика

Когда наука имитирует природу



УДК 004.94

ББК 32.818

Г46

Г46 Гийо Агнес, Мейе Жан-Аркади

Бионика.

Когда наука имитирует природу

Москва: Техносфера, 2013. – 280 с. + 8 с. цв. вкл. ISBN 978-5-94836-356-1

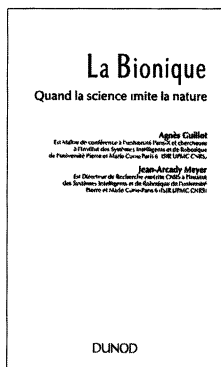
Бионика — молодая наука, родившаяся в 1960 году, — охватывает сегодня широкое поле исследований. Это технологические разработки, заимствующие изобретения природы; автономные роботы, имитирующие животных; гибридизации, где искусственные компоненты служат дополнением к живому организму, или наоборот — живые гибридные компоненты дополняют искусственные системы.

Авторы рассматривают множество примеров и знакомят читателя с разными областями бионики, ее практическими и фундаментальными разработками. Например, вы найдете здесь рассказы о текстурах с необыкновенными сцепляющимися (адгезивными) свойствами, которые к тому же способны «переклеиваться» бесчисленное число раз, как лапы ящерицы геккона. Вы познакомитесь с приспособлениями, возникающими в определенных экосистемах; с адаптивными роботами, которые обучаются на собственном опыте методом проб и ошибок или даже эволюционируют сами по себе поколение за поколением. А еще узнаете о разработках гибридных систем, где плесень ... управляет шестиногим роботом. Наконец, о нейропротезах, которые переводят мысль в соответствующее движение...

Книга, посвященная всему тому, чем живо интересуются науки естественные и технические, в полной мере отражает бурный творческий процесс в этой области.

УДК 004.94

ББК 32.818



© Dunod, Paris 2008

© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера» перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-356-1

ISBN 978-2-10-050635-4 (фр.)

Содержание

Введение	9
 Часть I. Структуры, способы, материалы	
Глава 1	
Заемствование технологий природы: от ремесла к индустрии	14
Изобретения для повседневной жизни	14
Передовая линия в индустрии	16
 Глава 2	
Структуры	21
Остовы	21
Формы	24
Текстуры	36
 Глава 3	
Способы	44
Как лучше соединить	44
Как лучше развернуться	50
Как лучше обращаться с жидкостями и газами	55
Как распространять звуки	57
Как лучше освоиться в разных средах	60
 Глава 4	
Материалы	63
Адгезивный продукт — еще один!	63
Эластичный продукт	66
Стойкие участники сопротивления: Прочность	71

Часть II. Поведение

Глава 5

От автоматов к аниматам	76
Философские игрушки	76
Программируемые автоматы	82
Прото-роботы	84
Кибернетические роботы	87
Интеллектуальные системы	93
Адаптивные роботы: аниматы	99
Изобилие источников для заимствования	101

Глава 6

Воплощенное действие	102
Плавание	102
Ползание	106
Ходьба	108
Полет	111
Захват	114
Перфорация	115

Глава 7

Продвинутые сенсоры	117
Зрение	117
Обоняние	124
Осязание	125
Мультимодальное восприятие	127

Глава 8

«Канализированные» архитектуры управления	129
Искусственный таракан	130
Разум множества	137
За пределами простых рефлексов	144

Глава 9

Обучающиеся роботы	146
Обучение через подкрепление	147
Обучение с помощью подражания.....	154
Обучение по ассоциации.....	156
Коллективное обучение	163

Глава 10

Развитие и эволюция в робототехнике.....	167
Развитие	167
Эволюция.....	178
Коэволюция.....	190

Часть III. Гибриды**Глава 11**

От протезов к киберпротезам.....	202
Древности	202
Пассивные протезы.....	203
Эра киберпротезов	205

Глава 12

Искусственные гибриды.....	207
Гибридизация с природными сенсорами	207
Гибридизация с природными эффекторами.....	210
Гибридизация с природными архитектурами управления	211
Другие гибридизации.....	218

Глава 13

Живые гибриды.....	224
Интеллектуальные протезы	225
Интеллектуальные эндопротезы	230
Протезы, предназначенные для радио-контроля.....	233
Эндопротезы стимулирующие и регистрирующие	237
Дух — над материей	240

Заключение	250
Биология и технологии.....	250
Биология и робототехника	252
Органическое и неорганическое	257
Перспективы?	258
Эпилог	261
Благодарности	262
Литература	263
Примечания	267
Предметный указатель	278

*Посвящается Агате, пусть она проникнется
заботой к этой планете, населенной столь
удивительными созданиями.*

Агнес Гийо

Преподаватель университета *Paris-X* и научный сотрудник Института интеллектуальных систем и робототехники Университета им. Пьера и Мари Кюри (*ISIR*), Париж 6.

Жан-Аркади Мейе

Директор Института интеллектуальных систем и робототехники Университета им. Пьера и Мари Кюри при Национальном центре научных исследований (*CNSR*), Париж 6.

Введение

Природа — великий учитель, особенно для того, кто наблюдателен.

Карло Гольдони

Нить паутины в пять раз прочнее и вдвое эластичнее нейлонового волокна, а летающий микродрон машет крылышками, как насекомое; кибер-рука позволяет осязать и ощущать тепло... Так человек пытается подражать всему возникшему в результате эволюции. Множество тому свидетельств сохранилось в исторических документах или в легендах со времен появления письменности. Двадцать четыре столетия назад один грек создал из дерева летающего голубя; три века спустя в Египте была изготовлена подвижная искусственная рука; по аналогии с текстурой осиных гнезд в начале нашей эры китайцы придумали бумагу.

Во все времена человеческий ум зондировал ум Природы, чтобы по ее подобию усовершенствовать собственные изобретения. Иногда технические возможности человечества этому не соответствовали. Например, навеянные полетом птиц и летучих мышей летательные аппараты, макеты которых рисовал Леонардо да Винчи, не смогли бы подняться в воздух. В его время еще не было достаточно легких материалов и мощных двигателей.

Начиная с XIX века технологический прогресс набрал головокружительные обороты. Вдохновленные индустриальной революцией, инженеры придумывали все новые способы воплощения в жизнь всевозможных природных конструкций и материалов.

В наши дни происходит другая революция. Речь идет об использовании бесконечно малых частиц материи, порядка миллиардной доли метра, при манипуляциях на уровне атомов. Действительно, нанотехнология предлагает совершенно оригинальные устройства,

применяющиеся в различных областях. Важное преимущество этих устройств — в их миниатюрности. Благодаря крошечным размерам механические, электрические и оптические свойства наноматериалов полностью отличаются от свойств макроматериалов. Для исследователей стало достижимым конструирование искусственных структур, имитирующих микроскопические структуры живой клетки.

Параллельно этим направлениям технического прогресса, происходит сближение природных и искусственных систем. В 1940–1950-е годы американский психолог Кларк Леонард Халл (*Leonard Hull*) заявил, что законы, управляющие поведением животных и механизмов, по-видимому, одинаковы и их можно с успехом взять на вооружение. В тот же период математик Норберт Винер (*Norbert Wiener*) основал новую дисциплину, которую назвал кибернетикой. В основу кибернетики положено сходство информационных процессов в природных и в искусственных системах. Чуть позже пионеры искусственного разума прибегли к той же аналогии и даже дошли до заявлений о полном сходстве компьютерного процессора и мозга. С этой точки зрения нечто искусственно созданное стало метафорой живого, а не наоборот, как это обычно бывает.

Идея о том, что науки о живом мире и технические дисциплины могут идти рука об руку, набирала силы. Так, в сентябре 1960 года, после американского симпозиума в Дайтоне (штат Огайо), у всех на слуху оказался термин* «бионика»¹. Совмещение биологии и техники, а затем биологии и электроники — заявленный предмет этой науки. Появилась обширная программа, объединяющая компетенцию инженеров и ученых-исследователей из самых разных областей знания: математиков, физиков, химиков, а также биологов и психологов. Это объединение предполагало искать в природе способы преобразования искусственных систем. А то, что можно назвать новой бионикой, пришло десяток лет спустя (и, несомненно, вместе с одним хорошо известным американским фельетоном: «Человек,

*Цифрами в верхнем индексе здесь и далее обозначены примечания авторов, которые можно найти в конце книги (см. раздел «Примечания»). А звездочками и другими нецифровыми обозначениями далее будут отмечаться постраничные сноски переводчика и редактора русского издания.

который стоит 3 миллиарда»). Речь идет о концепции гибридных систем, интегрирующих живые и искусственные компоненты.

Тогда начали развиваться три направления молодой науки. Первое описывало некоторые из множественных технологических воплощений природных структур, приемов и материалов. Например, оно пыталось объяснить, каким образом лапки ящерицы геккона успевают плотно «прилипнуть» за 1/8000 секунды к любой поверхности. Это помогло бы разрешить головоломку, которую представляет собой идея «сухого» прилипания — совершенного удерживания независимо от характера опоры. Второе направление охватывало поле исследования задач, будораживших умы людей с самых давних времен, но возродившихся к жизни лишь в последние годы. Речь идет о концепции автономных роботов, вдохновленной животными и их поведением. Таких роботов относят к так называемой «биозаимствованной робототехнике» (*la robotique bioinspirée*)*. Она, например, предполагает интерес к следующему феномену: каким образом альбатросу удастся целыми днями напролет планировать в воздухе, ни разу не взмахнув хотя бы одним крылом? Ответ на этот вопрос помог бы разрешить проблему летательных аппаратов с малым резервом горючего, такое решение можно было бы перенести на будущий микродрон. Наконец, третье направление касается атипичных произведений, предполагающих гибридизацию природных и искусственно созданных систем. Скажем, сюда относится задача создания «нейропротеза», который мог бы позволить страдающим тетраплегией† пациентам дистанционно управлять механизмами.

В предлагаемой читателю книге мы рассмотрим множество других примеров заимствований у природы и их комбинации, воплощаемые по мере исследования материи. Кроме того, будут поочередно кратко описаны особенности исторического пути различных сфер приложения бионики. В конце работы мы обсудим перспективы —

*Термин можно перевести также выражениями: «биовдохновленная робототехника» или «биоинспирированная робототехника». По-английски: *bioinspired*. — *Прим. перев.*

†Тетраплегия, или квадроплегия (от греч. «тетра» — четыре и «plege» — удар, поражение), — паралич всех четырех конечностей, обычно связан с повреждением спинного мозга. — *Прим. перев.*

по крайней мере так, как их себе представляют некоторые смелые исследователи. Помимо этого мы коснемся определенных ограничений, с которыми сталкиваются исследователи в работах такого рода. Сюда относятся этические проблемы и некоторые иные, затрагиваемые в различных текстах и законодательных актах во всем мире, призванных предотвратить любой риск пагубного применения этих искусственных творений.

ЧАСТЬ I

**СТРУКТУРЫ, СПОСОБЫ,
МАТЕРИАЛЫ**

ГЛАВА I

ЗАИМСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИРОДЫ: ОТ РЕМЕСЛА К ИНДУСТРИИ

Человеческий гений способен породить самые разнообразные изобретения благодаря применению различных инструментов, служащих одной цели. Однако он никогда не сможет создать нечто столь же прекрасное, столь же простое и приспособленное, как творения самой Природы, ибо в них все безупречно и нет ничего лишнего.

Леонардо да Винчи

Задолго до того, как бионика стала научной дисциплиной, ее практиковали в рамках ремесленного производства — ради улучшения обыденной жизни или расширения человеческих возможностей. В XIX веке стали появляться отдельные патенты, защищающие такие изобретения, и их незамедлительно брала на вооружение промышленность.

Изобретения для повседневной жизни

Восемь веков назад в Китае жители деревни Хонг-Чун, расположенной в горах Хуанг-Шань (что означает Желтые горы), проявили себя как первые архитекторы-бионики. Они придали своей деревне

форму быка и для обеспечения подачи воды придумали водную (гидрологическую) сеть, имитирующую пищеварительную систему. Головой такого быка служил холм, рогами — два больших дерева. Четыре моста изображали ноги, а деревенские дома — тело быка. По кишечнику чистая вода подавалась к подножию каждого дома и затем стекалась к озеру-желудку в форме полумесяца, а потом — к озеру побольше, которое имитировало живот быка, и, наконец, впадала в реку. Эта канализационная система вплоть до наших дней способна подавать воду, пригодную для питья и орошения сельскохозяйственных культур. Правда, сейчас жители деревни используют ее скорее в туристических видах, нежели в практических целях, тем более что деревня Хонг-Чун была включена в список мирового наследия ЮНЕСКО...

Этот пример имеет еще и символическую интерпретацию. В Китае бык олицетворяет долговечность. Происхождение и источники других заимствований у природы очертить труднее. Предполагают, например, что искусственные плотины из камня, датируемые 3-м тысячелетием до нашей эры, были заимствованы у бобров, что устройство паутины натолкнуло древних рыбаков на идею рыболовных сетей. Кроме того, полагают, что прекрасная терморегуляция ячеистых домов индейцев пуэбло в Новой Мексике — домов, построенных из смешанной с водой глины, — объясняется имитацией архитектуры глиняного гнезда ос-отшельников.

Имена некоторых первооткрывателей забылись, но другие сумели войти в историю. Китайца Чай-Луна* (или Тсай-Луна) считают изобретателем бумаги. Этот материал он создал в 105 году нашей эры, смешивая бамбук с водой, после внимательного изучения гнезд общественных, т.е. живущих роем, ос — родственниц упомянутых выше одиночных ос. Гнезда этих перепончатокрылых на самом деле состоят из дерева, смешанного со слюной. Они строятся вокруг сот, закрепленных на столбе или другой опоре, которые

*По преданию, Чай-Лун родился в городе Квей-Янге, в Южном Китае. В 75 г. он поступил на службу к императору Хо, а в 89 г. был назначен директором императорского арсенала. Работая в арсенале, Чай-Лун изобрел много видов нового оружия, которое долго употреблялось китайскими войсками. — Прим. перев. по материалам сайта: <http://expert.urf.ac.ru>

окружены множеством слоев из того же материала. Гораздо позже, в 1719 году, такая же наблюдательность позволила французскому естествоиспытателю Рене-Антуану Фершо де Реомюру* предложить рецепт производства более современной и мягкой бумаги на основе вторичного использования тряпья.

Передовая линия в индустрии

В XIX веке большинство изобретателей, полагаясь на интуицию и продвигаясь на ощупь, все же получили патенты на свои устройства. Ремесленные рынки остались в прошлом. Хороший пример перехода от эры ремесленной к эре индустриальной — история колючей проволоки. На западе США заменителем проволоки с железными колючками изначально служили ветки колючего техасского апельсинового дерева *l'oranger des Osages*, которые использовались индейцами племени сиу. Французские миссионеры вместо исконного местного «*Wazházhe*» дали дереву более легкопроизносимое название «*Osage*», или озаж. Из веток этого дерева индейцы сиу делали луки, а напоминающий каучук сок его несъедобных плодов использовали для раскраски лиц. Первые колонисты-американцы придумали ограждать свои владения зарослями апельсинового терновника, чтобы уберечь домашний скот. Про эту изгородь говорили, что она: «достаточно высокая для лошадей, достаточно прочная для быков и достаточно частая для свиней». Однако такая живая изгородь росла медленно, и некоторые находчивые фермеры заменили естественные заграждения металлической проволокой с железными колючками, имитирующими колючки на ветках терновника. Изобретение, названное индейцами «поясом дьявола», было усовершенствовано

*Рене Реомюр (1683–1757) — человек незаурядный. Его научные труды посвящены математике, физике, химической технологии, зоологии и ботанике. Он разработал способ производства матового стекла. В 1715 г. начал заниматься металлургией железа. В 1730 г. изобрел спиртовой термометр, шкала которого определялась точками кипения и замерзания воды. Шкала Реомюра долгое время была распространена в Европе. — Прим. перев. по материалам сайта: <http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/History/Persones/Reaumur.html>

Джозефом Ф. Глидденом, который в 1874 году заявил патент на производство колючей проволоки одному местному коммерсанту.

Распространение этого удобного новшества имело драматические последствия. Ковбои оказались перед лицом технологической безработицы. Изгороди, став съёмными и растяжимыми, спровоцировали ожесточенную борьбу между фермерами, стремившимися во что бы то ни стало заполучить каждый лишний клочок земли. Заграждения позволяли им то и дело расширять свои владения, вытесняя индейские племена и их главную пищу — бизонов, заставляя их перемещаться в местности, все более тесные и скудные. Во время войны между Севером и Югом проволочные заграждения использовались американцами для западни и охраны пленных. Колючая проволока стала «орудием политического управления пространствами»².

Использование изобретений и быстрое освоение любых инноваций в военные времена приносит злополучную выгоду. Первая мировая война для распознавания подводных объектов эксплуатировала гидролокатор, разработку которого к 1915 году завершил французский физик Поль Ланжевен* (*Langevin*). Этот пример — лишь капля в море. На первый взгляд, гидролокатор представлял собой прямое заимствование принципа эхолокации у морских животных, но на самом деле это не так. Сходство принципов работы искусственного гидролокатора и эхолокаторов у животных было обнаружено значительно позднее. Правда, в качестве реванша, во время Второй мировой войны тот же Поль Ланжевен, по иронии судьбы, оказался причастен к одному изобретению, которое, бесспорно, заимствовано у биологии. Речь идет о часах *Cricket Watch*[†] — первых наручных часах с функцией будильника.

Руководство американской армии стремилось снабдить своих солдат каким-нибудь устройством, позволяющим синхронизировать

*Поль Ланжевен (фр. *Paul Langevin*, 1872–1946) — французский физик и общественный деятель, создатель теории диамагнетизма и парамагнетизма. Член Парижской академии наук (1934), член-корреспондент Российской академии наук (1924) и почетный член Академии наук СССР (1929), иностранный член Лондонского королевского общества (1928). — По материалам Википедии: <http://ru.wikipedia.org/wiki>

[†]Знаменитые швейцарские часы *Cricket* со звуком сверчка или кузнечика. — Прим. перев.

военные операции. Часы-будильник уже в то время производила, с 1890 года, швейцарская фирма *Vulcain* (Вулкан), но они обладали двумя значительными недостатками. С одной стороны, издаваемые звонком вибрации систематически расстраивали механизм часов. С другой — слабый звук этого будильника легко заглушали окружающие шумы. Инженеры из всех сил старались привнести улучшения в это устройство и уже готовы были признать тщетность своих попыток. И тут Поль Ланжевен, будучи с визитом на предприятии, сказал своим собеседникам, что проблема эта вполне разрешима: если такое маленькое насекомое, как кузнечик, способно производить звук, разносящийся на десятки метров, то в часах, разумеется, можно добиться такого же эффекта... Это подтолкнуло идею сделать мембрану (во втором дне, с отверстием, способствующим распространению производимого часами звука) — стальную мембрану, на которой создается резонанс от маленького молоточка, по образцу стрекотательного аппарата насекомого. Часы *Cricket Watch* были усовершенствованы к 1947 году и, начиная с президента Эйзенхауэра, стали культовыми для многих президентов США.

В 1960 году, в эпоху холодной войны, в СССР был сбит американский самолет, а его пилота заключили в тюрьму. Это было в тот период, когда проходила знаменательная конференция в Дайтоне, организованная военно-воздушными силами США на базе Райт-Паттерсон*. Эта конференция имела широкий резонанс помимо интереса к теме «военных секретов», которых она касалась. Она вдохновила исследования во множестве публичных и частных лабораторий во всем мире. Так, по инициативе одной из лабораторий института *INRA*[†] в 1966 году был организован первый научный симпозиум в Италии, посвященный эхолокации (сонарам) у морских и наземных животных. Затем исследования в области бионики стали быстро распространяться в мире, и особенно в Германии. В 2005 году в рамках Всемирной выставки в Аиши (Япония), павильон Германии

*Об этой конференции упоминалось выше в связи с возникновением термина «бионика». См. также авторский комментарий 1 в разделе примечаний в конце книги.

[†]Видимо, французский Национальный институт исследований в области сельского хозяйства (*Institut National de la Recherche Agronomique*). — Прим. перев.

был целиком посвящен бионике. Однако во Франции, несмотря на официальные заверения, междисциплинарным исследованиям долгое время не уделяли должного внимания...



Рис. 1.1. Несколько примеров фауны кембрийского периода самых невероятных форм Большинство из них относятся к группам, в настоящее время совершенно исчезнувшим: из 120 ветвей осталось примерно 33, среди которых можно назвать, например, губок и моллюсков

Три последующие главы посвящены развитию технологических изобретений в области бионики, заимствованных у живых систем. Эти последние экспериментировали и продолжают экспериментировать поныне с помощью множества морфологических форм и механизмов, обеспечивающих их выживание. После двух с половиной миллиардов лет, в течение которых изолированные клетки доказывали свою сверхустойчивость в водной среде, над поверхностью воды развилось множество разновидностей многоклеточных организмов в виде самых сюрреалистических³ форм. Из этого огромного

множества архитектурных форм осталась лишь малая часть представителей, но зато достаточно вооруженных, чтобы продолжать существовать в морских глубинах до наших дней. Цианобактерии (бактерии, способные к фотосинтезу, которых ранее относили к водорослям) и растения первыми осмелились использовать сушу как новую экологическую нишу. Для противодействия сухому воздуху, силе тяготения, ультрафиолетовым лучам, резким колебаниям климатических условий на поверхности Земли они изменили свою структуру и физиологию. Немного позже появились беспозвоночные животные, затем позвоночные. Их морфология и физиология трансформировались под тем же давлением внешних условий, к которому до них приспосабливались растения.

Таким вот образом жизнь измышляет огромную коллекцию достижений, адаптированных к невероятному разнообразию форм существования на планете. Но какие ингредиенты лежат в ее основе? Всегда одни и те же! Около 99% углерода, водорода, кислорода и азота, в остатке — примерно двадцать других элементов из сотни прочих, составляющих известную нам Вселенную.

Однако Природа не так легко раскрывает секреты своей кухни. . .

ГЛАВА 2

СТРУКТУРЫ

Переписывать всегда открытую книгу Природы.

Антонио Гауди

Римский архитектор Витрувий* 2100 лет назад впервые написал о «расположении зданий храмов и их пропорции в соответствии с измерениями человеческого тела». Образцами для архитектуры стали пропорции природы, особенно наиболее совершенной ее части — человека.

Так продолжалось вплоть до XVIII столетия. Затем круг природных моделей стал охватывать другие создания животного и растительного мира в соответствии с идеей о том, что искусственные структуры подчиняются тем же физическим законам, что и структуры естественные.

Остовы

Лист амазонской виктории (лат. *Victoria amazonica*) — водного растения, родственного кувшинке, — может достигать двух метров в диаметре. Радиальные жилки листа виктории, идущие от подводного стебля, значительно усилены множеством гибких концентрических и противоположно направленных жилок. Этот остов делает лист виктории таким прочным, что он оказался способен выдержать вес Анни — внучки британского архитектора Джозефа Пэкстона (*Paxton*)[†].

*Марк Витрувий Поллион (лат. *Marcus Vitruvius Pollio*) — римский архитектор, инженер, теоретик архитектуры второй половины I века до н.э.

[†]Джозеф Пэкстон (англ. *Joseph Paxton*, 1803–1865) — английский архитектор, садовод и ботаник. Был седьмым сыном небогатого фермера. ru.wikipedia.org/wiki/

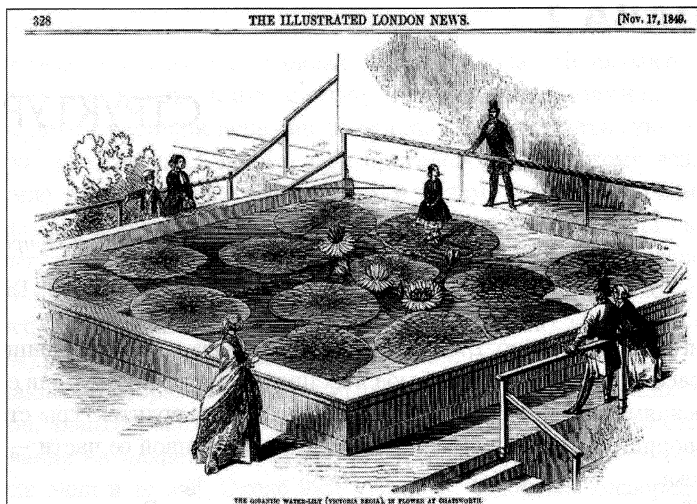


Рис. 2.1. Восемилетняя малышка Анни Пэкстон демонстрирует прочность листа *Victoria amazonica*

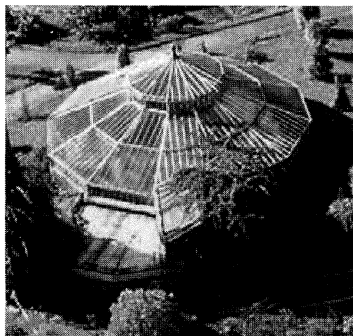
Сначала Пэкстон был садовником, а затем получил статус главного интенданта в поместье Чатсуорт-хаус*, где и попробовал себя в качестве архитектора. Он вырастил в оранжерее единственный черенок виктории, привезенный из Гайаны. Растение выросло, размножилось и распространялось с таким головокружительным размахом, что он вынужден был придумать другое архитектурное сооружение для его содержания. Он задумал строение из стекла и железа, имеющее такой же каркас, как лист виктории, — его «Дом лилий» («*Lily House*») снискал громадный успех.

Затем эта конструкция вдохновила Пэкстона на создание Хрустального дворца в Лондоне, который стал гвоздем международной выставки 1851 года. Пэкстон нарисовал проект этого сооружения всего за 9 дней. Его революционная конструкция была создана из отдельных модулей — 293 000 стеклянных панно, которые мон-

*Точнее: герцог Девонширский предложил Пэкстону должность главного садовника в своей пышной резиденции Чатсуорт-хаус (*Chatsworth House*) — Прим. перев. по материалам Интернета.

тировались воедино с помощью двух тысяч человек целых восемь месяцев. Эта изящная, но очень прочная конструкция долгое время была центром множества зрелищных выставок, пока ее не разрушил пожар. Однако сохранился построенный по тому же принципу отголосок Хрустального дворца — оранжерея «Виктория» в ботаническом саду Страсбурга, переименованная в оранжерею де Бари (*de Barry*) в честь первого директора этого сада.

Рис. 2.2. Оранжерея де Бари в ботаническом саду Страсбурга, каркас которой напоминает остов листа *Victoria amazonica*



Скелеты животных тоже служат хорошими моделями. Конструкция четырех стоек Эйфелевой башни, например, сходна по структуре с бедренной костью человека, сочлененной с костями таза своего рода «консолью с выступом над пустотой»*, хотя это сходство и оспаривается. Тем не менее это сооружение сочетает в себе необыкновенную легкость (на каждые 30 см по высоте башни оказывается давление менее 10 г) и устойчивость, которая позволяет башне противостоять сильным ветрам, дующим со скоростью более 150 км/ч. . .

Легкие, очень изящные и прочные микроорганизмы с филигранной конструкцией скелетов появились на Земле почти за 600 миллионов лет до нас. К ним относятся морские простейшие одноклеточные организмы радиолярии, или лучевики, не видимые невооруженным глазом. Эти микроорганизмы состоят из одной-единственной

* Видимо, имеется в виду строение сустава с «наплывом» кости сверху. — Прим. перев.

клетки, которая окружена прочной радиальной структурой на основе кремния с характерной для каждого вида радиолярий геометрией. В процессе эволюции организация их скелета модифицировалась в сторону экономии конструкторского материала, став более разреженной в середине клетки: радиолярии четвертичного периода в результате оказались вчетверо легче, чем радиолярии элоцена. Более легкие, но по-прежнему необычайно прочные!

В 1950-е годы этот факт заинтересовал французского архитектора Робера Лё Риколе (*Robert Le Ricolais*), профессора Пенсильванского университета в Филадельфии. Он стал создателем весьма авангардистских конструкций, копирующих скелеты разнообразных радиолярий, которые в XIX веке в совершенстве изобразил немецкий биолог Геккель* (*Haeckel*).

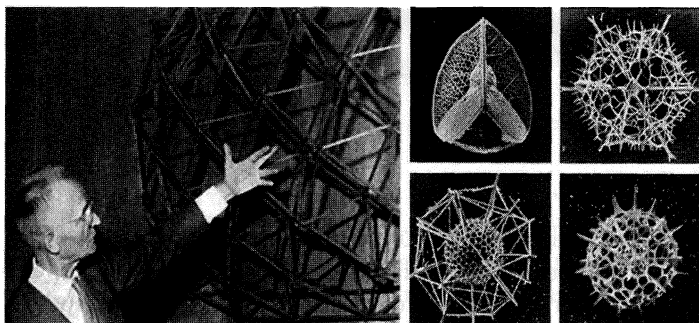


Рис. 2.3. Слева: Робер Лё Риколе около одной из своих архитектурных конструкций, заимствованных у радиолярий. (© René Motro, Университет Montpellier II.) Справа: ажурные системы и радиолярии, нарисованные Геккелем

Формы

В 1420 году перед ученым советом, который сомневался в его компетенции построить купол собора Санта Мария дель Фьоре во Флоренции,

*Эрнст Гёнрих Филипп Август Гёккель (нем. *Ernst Heinrich Philipp August Haeckel*; 1834–1919) — немецкий естествоиспытатель и философ. Автор терминов «питекантроп», «филогенез» и «экология». — По материалам Википедии.

ренции, Филиппо Брунеллески* резким движением положил на стол яйцо — так, что оно немного раздавилось в основании. Все присутствующие смогли убедиться в том, что яйцо в виде вытянутой полусферы остается вертикальным и неподвижным. Архитектору вряд ли удалось бы доказать верность своих расчетов иным способом... Яйцо флорентийского Колумба сработало, Брунеллески получил карт бланш, и построенный им гигантский собор стоит на своем месте до сих пор. По совпадению или нет, конструкция собора основана на тех же принципах, что и скорлупа яйца, — из кирпичей, которые обоюдно блокируют друг друга за счет силы трения[†] и которые стали такими же совершенными классическими опорами, как своды из дерева. Притом хитроумный стык (соединение в паз) двух куполов обеспечил хорошее распределение нагрузок.

Очевидно: яйцо не должно содержать в себе своды, которые стесняли бы развитие зародыша. Однако эта структура способна выдерживать воздействие значительной силы: скорлупа куриного яйца, толщиной 0,3 мм, раскалывается лишь при давлении не менее 3 кг, а скорлупа яйца страуса, которая в 10 раз толще, выдерживает в 20 раз большее давление. В скорлупе использована одна хитрость: кристаллы минеральных солей, из которых она состоит, ориентированы к центру яйца, и тем самым она сама себя блокирует, как кирпичи свода флорентийского собора.

*Сомнения комиссии объяснимы. Купол Флорентийского собора — одно из самых грандиозных архитектурных свершений эпохи Возрождения — брался воздвигнуть архитектор, не получивший специального образования, ювелир по профессии. Правда, для первой половины XV века это было обычным делом. Специального архитектурного образования не существовало. Авторами архитектурных проектов становились скульпторы, живописцы и ювелиры вроде Брунеллески. — *Прим. перев. по материалам сайта* <http://www.brunelleschi.ru>

[†]Загадка сооружения этого грандиозного купола не разгадана до сих пор. Разумеется, Брунеллески гениально нашел правильный изгиб ребер — дуга в 60 градусов обладает наибольшей прочностью. Вторая техническая находка — способ кладки, когда кирпичи располагаются не горизонтально, а с наклоном внутрь, при этом центр тяжести свода оказывается внутри купола — своды росли равномерно (восемь синхронных групп каменщиков), и равновесие не нарушалось. Кроме того, в каждой лопасти свода ряды кирпичей образуют не прямую, а слегка вогнутую, провисающую линию, не дающую разломов. Кирпич для строительства купола использовали очень высокого качества. — *По материалам сайта* <http://www.brunelleschi.ru>

Эти характеристики недавно были изучены и повторены разными архитекторами⁴, чтобы точнее рассчитать толщину слоев кирпичной кладки перед реконструкцией соборов или определить направление механических напряжений в громадных конструкциях.

Обтекаемая форма равным образом известна как быстро движущаяся в воздушной и водной среде, практически не встречая сопротивления. Как ни странно, именно морские животные определили множество моделей всевозможных наземных и воздушных мобилей!

Например, форма тропической рыбы-чемодана (франц. *poisson-coffre*) испытывалась инженерами фирмы Даймлер (*Daimler AG*), чтобы добиться экономии горючего в будущих автомобилях. Эти разработки привели к прототипу, представленному в 2005 году в Вашингтоне. Хотя упомянутая рыба — почти кубическая по форме, это качество парадоксальным образом обеспечивает ей великолепную гидродинамику. Согласно представленным инженерами расчетам, аэродинамические показатели этой рыбы выше, чем у современных автомобилей: ее коэффициент скольжения в воздухе равен 0,06 вместо 0,30 — у автомобилей!⁵

Автомобиль с заявленным именем «мерседес-бенц бионик кар» имеет коэффициент скольжения в воздухе 0,19 и притом экономит 20% топлива и дает на 80% меньше выбросов оксида азота. Кузов этого автомобиля, составленный из многочисленных шестиугольных панелей, напоминает жесткий панцирь рыбы, поддерживаемый позвоночником. Эта машина пытается соперничать с природой в двух ее главных принципах — легкости и прочности, впрочем, те же принципы лежат в основе автомобильной индустрии.

Посмотрите на рисунок 2.4: возможно, самолет будущего тоже будет напоминать по форме рыбу! Самолет *Smartfish*, или «быстрая рыбка», был задуман в нескольких международных исследовательских лабораториях⁶, он вдохновлен формой разных видов рыб, в частности тунца — одного из самых быстрых и ловких морских хищников. Мини-модель этого самолета, всего метр в окружности, была с успехом апробирована в апреле 2007 года.

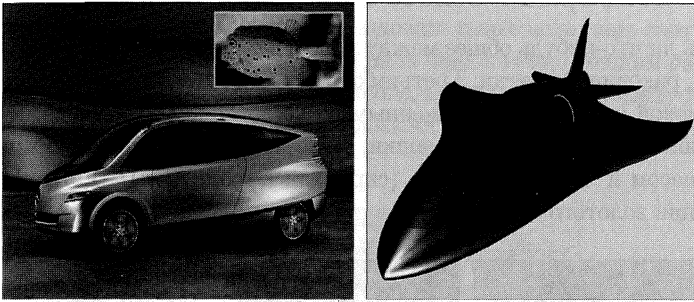


Рис. 2.4. Слева: автомобиль «рыба-чемодан» и его природный прототип (Фото © Mercedes-benz Cars, Media materials and pictures, Штуттгарт). Справа: самолет Smartfish (Фото © Koni Schatroth, Team SmartFish GmbH)

Сейчас испытывается связанный с таким же заимствованием весьма продвинутый велосипед, вдохновленной формой антарктических пингвинов. И возможно, в скором времени эта модель покорит лидеров велопробега Тур де Франс. На самом деле, форма этих птиц позволяет им плавать с минимальным расходом энергии, поскольку тормозящее лобовое сопротивление воды сведено к минимуму. По мнению исследователей из Технического университета Берлина⁷, будь пингвины машинами, они могли бы проехать 1500 км на одном литре сжиженного газа! Этот примечательный факт вдохновил концепцию новых наземных средств передвижения, вроде упомянутого велосипеда, а также прототипы самолетов и подводных лодок.

Закончим обзор «биоинспирированных» средств передвижения примером *Shinkansen* серии 500, японской фирмы *TGV*. Нос этой машины имитирует форму головы и клюва зимородка. Такая форма позволяет ему развивать большую скорость и экономить энергию при прохождении аэродинамической трубы. На самом деле проблема приспособленности к разному сопротивлению воздуха за пределами туннеля и внутри него похожа на проблему, которая без труда решается птицами, пересекающими границы сред неодинаковой плотности, например границу воздуха и воды.

... Форма в золоте

Есть ли что-нибудь общее между подсолнухом, Страсбургским собором, раковинной улитки, Третьим фортепьянным концертом Бартока, сосновой шишкой, изображенным Моне вокзалом Сен-Лазар, сердцевиной какой-нибудь ромашки, лучезарным городом Корбюзье*, ананасом и Страдивариусом (скрипкой Страдивари)? Есть. Пропорции золотого сечения...

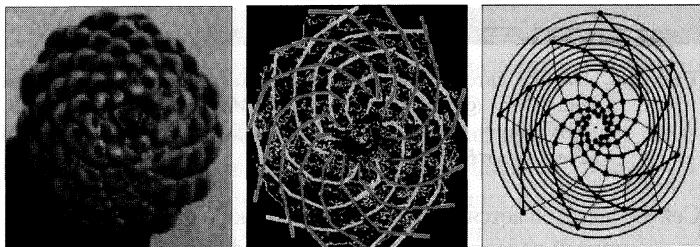


Рис. 2.5. Сосновая шишка и золотое сечение. *Слева:* чешуйки сосновой шишки образуют спирали, число которых соотносится с числами последовательности чисел Фибоначчи. Если представить четыре угла чешуйки сосновой шишки в виде точек и затем соединить эти точки, то мы получим спирали, которые закручиваются вправо, а также другие — закручивающиеся влево. *В центре:* получится 8 спиралей, повернутых в одном направлении (на цветной вклейке они зеленые), и 13 спиралей, идущих в другом (на вклейке они красные). А числа 8 и 13 являются соседними членами ряда Фибоначчи: 1; 1; 2; 3; 5; 8; 13... *Справа:* через каждую точку проходят две спирали. Количество точек на каждой из этих спиралей тоже соотносится с двумя числами последовательности Фибоначчи. (См. цветную вклейку)

Это число вновь и вновь обнаруживают в организации многих природных форм. Замечено, например, что соотношение между радиусами спиральных конструкций аммонитов и улиток соответствует пропорциям золотого сечения. Аналогично, сердцевина подсолнуха или ромашки, чешуйки сосновой шишки или ананаса

*Ле Корбюзье (1887–1965) — знаменитый французский архитектор конструктивист, урбанист, авангардист, пионер модернизма. Построил несколько зданий в Москве. Например, Дом Центросоюза в 1928–1935. — *Прим. перев.*

расположены множественными спиралями, завернутыми в противоположных направлениях, чьи последовательные величины соответствуют каким-нибудь двум членам ряда Фибоначчи, стоящим рядом друг с другом. Число листьев на стебле, встречающихся между двух листьев, расположенных в одной плоскости, тоже соответствует этой последовательности чисел.

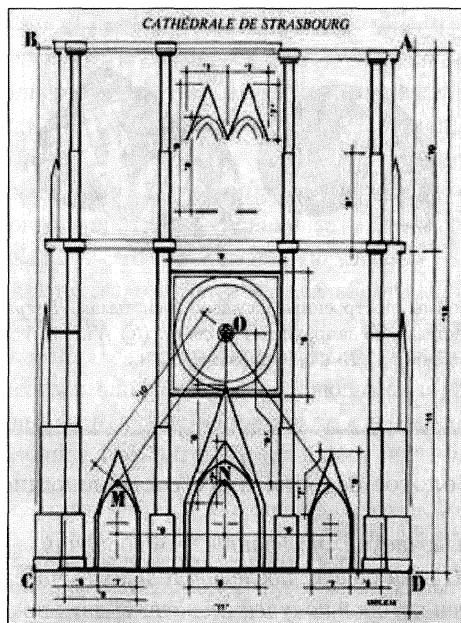


Рис. 2.6. Фасад Страсбургского собора* вписывается в золотой прямоугольник (ABCD), и многие архитектурные детали этого фасада связаны с золотым числом

*Кафедральный собор Страсбурга — один из крупнейших готических соборов в истории европейской архитектуры. Нынешнее здание Страсбургского собора строилось в период 1176–1439 гг. С 1647 по 1874 год Страсбургский собор был самым высоким зданием в мире (потом его обогнала церковь Св. Николая в Гамбурге). Высота башни собора со шпилем составляет 142 м (на сегодняшний день это самый высокий собор Франции после 151-метрового Руанского). — Прим. перев. по материалам Интернета.

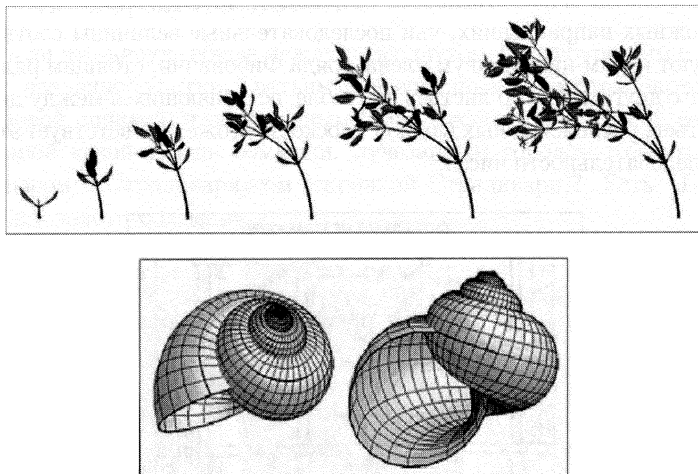


Рис. 2.7. Формы, построенные согласно L -системам. *Вверху:* разветвление растения по направлению к свету. (© William Van Haeve, Hasselt University.) *Внизу:* раковина улитки

Золотое сечение и его составляющие

Леонардо Пизанский, псевдоним — Фибоначчи, — итальянский математик XIII века описал последовательность чисел, каждый последующий член которой получен сложением двух предыдущих. Изначально этот подсчет призван был всего лишь помочь определить, сколько кроликов можно получить от одной пары в течение года, при условии, что каждая пара каждый месяц производит новую пару и ни один кролик не погибает. Последовательность начинается с «1» (вторая единица получена сложением этой единицы с нулем: $0 + 1 = 1$). Таким образом, этот ряд дает нам следующие числа: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144 и т.д. Одна из особенностей этой последовательности состоит в том, что математическое соотношение между двумя ее соседними членами ($3/2$, $5/3$, $8/5$ и т.д.) всегда дает один и тот же результат — золотое сечение, или золотое

число φ называемое «фи» — в честь архитектора и скульптора Фидия. Полученное при таком делении значение — число φ , или золотое сечение, — всегда составляет приблизительно $1,618^*$. Это же число определяет пропорции золотого прямоугольника[†], соотношение длины и ширины сторон которого дает число φ , а также размеры золотого треугольника — равнобедренный треугольник, пропорция между большей и меньшей сторонами которого тоже дает число φ , и т. д. Кроме того, Фидий заметил, что при этом «математическое отношение меньшей части к большей равно отношению большей части к размерам фигуры в целом». То же касается знаменитого «Человека Витрувия» — модели человеческих пропорций, нарисованной Леонардо да Винчи.

Принцип последовательности Фибоначчи может быть обобщен. Речь идет о повторении некоего орнамента (мотива, темы) в разных масштабах (шкалах). Это определение «фрактала» — термин введен французским математиком Бенуа Мандельбротом (*Benoit Mandelbrot*) в 1970-х годах, чтобы описать все фигуры, представляющие феномен «самоподобия»[‡] (франц. *autosimilarité*) в разных измерениях. Это может касаться фигур, чьи повторяющиеся в разных масштабах лейтмотивы идентичны (например, последовательные камеры моллюска-кораблика, элементы листа папоротника или хвоинки хво-

* А при обратном делении *меньшего* и соседних членов ряда Фибоначчи на *большой* член всегда получается приблизительно 0,618 (по мере возрастания ряда точность этого числа увеличивается). — *Прим. перев.*

† Пропорции золотого прямоугольника и другие мерки золотого сечения характерны для любых традиционных построек — начиная от древнегреческих храмов и заканчивая простой деревенской избой — пропорциями ее дверей и окон (иногда они подправляются наличниками). Дело в том, что соотношения золотого сечения изначально воспринимаются человеческим глазом как приятные, гармоничные, красивые. Это — своего рода божественный код красоты. И когда мастер создает нечто на глазок, прикидывая, где расположить ту или иную деталь, подгоняя ширину и высоту объекта и стараясь сделать все красиво, он невольно попадает точь-в-точь в пропорции золотого сечения. То же касается любого мало-мальски эстетически чувствительного человека, когда он выбирает, в каком месте на стене лучше повесить картину или зеркало, как расположить какую-нибудь безделушку на полке и т. п. — *Прим. перев.*

‡ Фрактал (лат. *fractus* — дробленный, сломанный, разбитый) — геометрическая фигура, обладающая свойством *самоподобия*, то есть составленная из нескольких частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком. — *ru.wikipedia.org*

ща) или лишь неопределенно однородны (как разветвления сосудов и капилляров нашей кровеносной системы, разветвление деревьев или беспорядочный рисунок береговой линии океана).

В 1968 году венгерский биолог Аристид Линденмайер для обозначения общей модели развития живых систем предложил формальный математический термин «*L*-система». Она имеет сходство с последовательностью чисел Фибоначчи и ее пропорциями. При этом основные элементы такой системы моделируются с помощью математических символов. В каждом поколении элементы воспроизводятся, следуя простым правилам, но в результате получается очень сложная форма. По принципам *L*-системы моделируется, например, форма листьев папоротника, форма снежинки или раковина улитки.

Эти «божественные пропорции» известны очень давно и воспроизводятся в конструкции зданий, при создании живописных полотен и в музыкальных композициях. Наиболее известны их воплощения в архитектуре. Так, Корбюзье вводил их в большинство своих творений. Это касается и наружных фасадов, например *Cité Radieuse de Marseille* (проект «лучезарного города» в Марселе*), и элементов интерьера, например расположения витражей часовни *Ronchamp*, форма которой напоминает панцирь краба. Помимо этого Корбюзье разработал стандарт, так называемый единый Модульор (*le Modulor*) — систему гармонических пропорций, которую применил в своих послевоенных проектах. Она позволяет проводить

*Корбюзье построил в Марселе в 1952 году грандиозный модернистский комплекс — жилой дом, рассчитанный на проживание 1600 человек, — задуманный в соответствии с его концепцией удобного для жизни, зеленого «лучезарного города» и с использованием введенного им же понятия «*unité d'habitation*» («жилая единица»). Основной особенностью этого дома-города стала организация жилых блоков по принципу коммуны с интеграцией в жилую среду торговых и развлекательных площадок, а также использование принципа вертикального озеленения, что давало возможность обитателям «Марсельского блока» проводить свободное время, питаться, заниматься спортом и делать покупки в пределах этой коммуны, не выходя за пределы дома. — Прим. перев. с использованием материалов Интернета.

идеальные измерения, скажем, определять размеры комнаты и ее обстановки в соответствии с пропорциями человеческого тела.

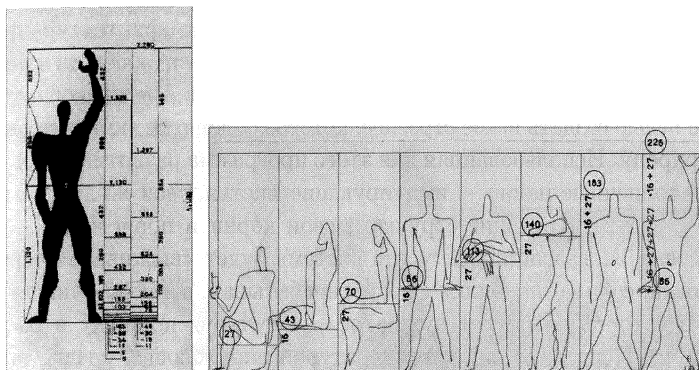


Рис. 2.8. Модульор Корбюзье и его применение для расчетов высоты жилого помещения и предметов мебели, приспособленных к среднему человеческому росту.
(1945, *Archive FLC B3-(20)11* © F.L.C./Adagg, Paris, 2013)

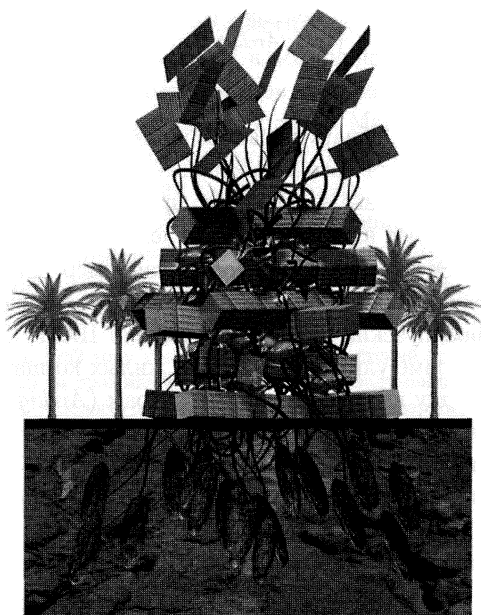
Итак, обнаруживаемое в различных формах повторение сходных орнаментов, или мотивов, называют фракталами. Архитекторы, тот же Корбюзье и множество других современных зодчих, активно используют их в своей практике.

Эти формы применяют, например, для решения проблем малогабаритной квартиры-жилища в ограниченном пространстве. Так, французский архитектор Ионель Шейн (*Ionel Schein*) создал дом в форме улитки и комплекс жилых комнат в отеле, напоминающий стопку капсул. Группа Архиграм (*Archigram*) по аналогии создала целый город *Plug-In City*, удобно размещающийся в одном здании, внутри которого можно переставить, объединить или заменить любые выбранные элементы или модули с разными функциями.

Подобная логика повторений лежит в сердце работ Дэни Долленса (*Dennis Dollens*) — архитектора, живущего в Новой Мексике и преподающего в университете Каталонии. Его проекты жилищ

по своей структуре и функциям вдохновлены клетками растений. Используя программное обеспечение, он применяет *L*-системы Линденмайера для имитации на компьютере разветвлений растительных структур. В результате использования простого закона развития и повторения Долленс получает очень сложные по архитектуре формы. Так, проект Аризонская башня (*Arizona Tower*) обобщил данные о морфологии и физиологии растений, растущих в Аризонской пустыне, с целью создать некое строение, которое будет тесно интегрировано в Природу. Используемая для этого программа развития породила свои солнечные панно — имитирующие листья, свои жилые комнаты — соответствующие стручкам, свои корни и пористость — как у дерева. Согласно проекту, эта система будет «выживать» черпая энергию солнца, накапливая ее и перерабатывая, а также очищая воду, в которой она будет нуждаться, модулируя поставку и расход калорий в соответствии с температурой окружающей среды, определяя агрессивные выбросы или аллергены и приспосабливаясь к ним.

Рис. 2.9. Проект *Arizona Tower*. (©Dennis Dollens. Международный университет Каталонии, Барселона). (См. цветную вклейку)



Другие проекты, такие, например, как *Fab Tree Hab*, который ведут архитекторы и инженеры из MIT (*Massachusetts Institute of Technology* — Массачусетский институт технологии) ставят целью таким же образом «выращивать» жилища, как элементы естественной экосистемы, — которые берут на себя все ее функции. Придерживаясь той же логики, проект будущего Института наномедицинских технологий и биологии в Ченгду (*Chengdu*), Китай⁸, тоже вдохновлен морфологией и физиологией живой клетки.

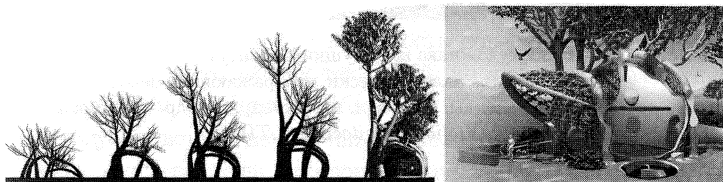


Рис. 2.10. Проект *Fab Tree Hab*. (© Mitchell Joachim, Terreform)

Современные зодчие не колеблясь подхватывают факел каталонского архитектора и художника Антонио Гауди — прилежного ученика Природы, которая вдохновляла его на создание многочисленных предметов мебели, художественных объектов и строений, таких как удивительный кафедральный собор — храм Святого Семейства в Барселоне (*Sagrada Família de Barcelone*), начатый в 1884 году и оставшийся незавершенным. Изобретательность его творения до сих пор не знает себе равных. А в свое время она вызывала ожесточенную критику. Особенно примечательна резкая критика писателя Джорджа Оруэлла*. Около 1936 года, будучи в Барселоне, Оруэлл сокрушался, говоря о соборе Саграда Фамилия: его «можно считать одним из наиболее уродливых сооружений в мире. Собор имеет четыре пробитых множеством "бойниц" шпиля, по силуэту — точь-в-точь бутылки от глинтвейна. В отличие от большинства церквей Барселоны, он не был разрушен во время гражданской войны —

* Джордж Оруэлл (англ. *George Orwell*), настоящее имя — Эрик Артур Блэр (1903–1950) — английский писатель и публицист. Наиболее известен как автор антиутопического романа «1984» и повести «Скотный двор». — ru.wikipedia.org

говорят, его пощадили из-за «художественной ценности». Думаю, анархисты проявили дурной вкус, не взорвав его, когда им представилась такая возможность...»

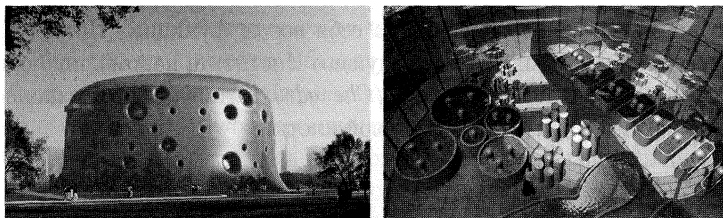


Рис. 2.11. Взгляд художника на будущий Институт в Ченгду и его внутренний дворик, аллегорически изображающий некоторые клеточные органеллы: вакуоли, митохондрии и др. (© Sloan Kulper, Kennedy & Violich Architecture, LTD)

Текстуры

Оболочки тел животных, как хрупких созданий, так и мощных хищников, выполняют множество функций. Они предполагают постоянный обмен между данным организмом и окружающей его средой. Иногда они предназначены для функций очень специфических, связанных с климатическими условиями или каким-то особенным образом жизни своего хозяина. В результате появляются невиданно сложные структуры с полированной лощеной поверхностью тела, которая представляется нам, людям, верхом совершенства обработки.

Есть растения, например эвкалипт, кофейное дерево, финиковая пальма, акации и агавы, которые можно было бы причислить к разряду «ловцов тумана»*, а также сюда можно отнести жука-скарабея. И с этой точки зрения мы имеем здесь пример весьма поучительный.

* Авторы используют здесь придуманное ими самими выражение «*dé-brouillards*» (кавычки авторские), что в первую очередь хочется перевести как «лишенные тумана», поскольку предлог «*dé*» — во французских словах чаще всего означает отрицание или лишение того, что обозначено в коренной части слова, но такой перевод противоречит смыслу изложения. Одно из редких технических значений слова «*dé*» (уже в качестве существительного) — «захват», поэтому предлагаю такой перевод. — *Прим. перев.*

Известно, что некоторые растения на самом деле обладают способностью собирать туман — это еще называют «горизонтальным орошением». Наиболее показательным в этом смысле, несомненно, было ныне исчезнувшее *Garoe*, или дерево-фонтан, — символ Канарских островов, которое способно было «производить» 80 литров воды в сутки. Перечисленные растения объединяет общая способность приспосабливаться к условиям очень жаркого климата. Их адаптация к сухости воздуха выражается в защите своей поверхности от испарений воды — часто она бывает покрыта своеобразным восковым веществом, а иногда снабжена маленькими волосками, помогающими удерживать влагу. Способность поверхностного орошения обеспечивается не только их текстурой, но и их местоположением. Этим растениям приходится взбираться достаточно высоко — туда, где их обдувает ветер и вокруг них возникают воздушные завихрения.

Такие качества были воспроизведены в виде бесконечной сети жилок, улавливающих за счет конденсации мельчайшие капельки *каманчаки* (*camanchaca*) — тумана, который образуется вблизи гор в чилийской пустыне Атакама. В 1987 году в засушливом регионе Эль Тофо были созданы 50 первых прототипов подобной сети жилок — каждая сеть занимала пространство 48 м². Их текстура из полипропилена толщиной 0,1 мм позволяла накапливать капли воды, потом под действием гравитации капли соскальзывали в желоб, расположенный у подножия этого сооружения. Затем вода поступала в резервуар, находящийся в нескольких сотнях метров. Она предназначалась для жителей двух рыбацких деревень — Чунгунго и Лос Хорнос. Уже через несколько лет 75 таких сетей позволяли поставлять по 40 литров воды на человека в сутки. Впоследствии этот проект оказался заброшен, став жертвой собственного успеха, повлекшего неожиданный наплыв населения. Однако подобные сети функционируют в настоящее время в других засушливых регионах, например в Йемене.

Пустыня Намиб на юго-западе Африки еще более засушлива, чем Эль Тофо. Несомненно, она является самым жарким местом в мире. Обитающие здесь ящерицы вынуждены буквально танцевать на песке, чтобы не поджарить свои лапки. Однако каждое утро в пустыне образуется очень густой туман, который не может превра-

титься в дождь, поскольку быстро уносится ветром. Такие условия могут объяснить странный ритуал: скарабей стенокара (*Stenocara*) падает ниц лицом к ветру и словно бы медитирует на протяжении всего того времени, пока продолжается этот благодатный туман. Разумеется, стенокара не медитирует, он — пьет. Микроскопические капли, которые периодически образуются на поверхности его надкрыльев, стекают прямо ему в рот.

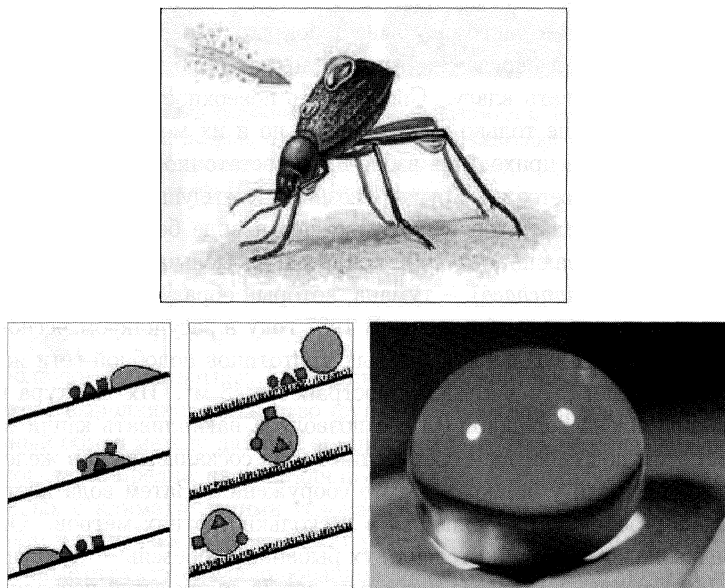


Рис. 2.12. Поверхности частично и полностью гидрофобные. *Вверху:* скарабей *Stenocara*. *Внизу слева:* эффект лотоса: пылинки на гладкой поверхности лишь перемещаются вместе с каплей воды; с шероховатой поверхности пылинки уносятся вместе с каплей воды. *Внизу справа:* взаимодействие между гидрофобной шершавой поверхностью и каплей жидкости сводится к нескольким точкам соприкосновения. Это позволяет капле воды сохранять сферическую форму и способствует тому, что она стекает при минимальном наклоне поверхности. (© Wilhelm Barthlott, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Bonn)

Каким образом надкрылья жука задерживают капли воды и позволяют им быстро стекать, а не испаряться или уноситься с ветром?

Это чудо разгадали два британца — зоолог и инженер⁹. При помощи электронного микроскопа они обнаружили, что шероховатые крылышки жука скарабея усыпаны маленькими бугорками, плоские верхушки которых покрыты неким гидрофильным веществом. А скаты этих бугорков испещрены сплюснутыми сводами по 10 микрон в диаметре, они расположены в виде шестиугольника и покрыты водоотталкивающим воском. Таким образом, молекулы воды собираются на верхушках бугорков и, испытывая электростатическое притяжение к гидрофильному веществу, не испаряются, не уносятся ветром. Когда капля достигает определенного размера, гравитация ее сталкивает с вершины бугорка, и она прекрасно катится насекомому в рот благодаря водоотталкивающим скатам бугорков.

Вышеупомянутые исследователи — а затем и другие — задумали создать подобную текстуру, напоминающую надкрылья жука скарабея. Они покрыли стеклянную поверхность очень маленькими стеклянными шариками, умащенными воском, и нанесли на верхушки получившихся бугорков спирт, обеспечивающий гидрофильность. Исследователи отметили, что независимо от температуры поверхности на ней легко собирается роса, причем очень эффективно. Затем они наудачу разместили шарики подобно бугоркам скарабея — приблизительно в том же регулярном порядке, — и тогда возможности сбора воды намного улучшились: она текла всегда самым неподвижным образом.

В 2006 году разработчики из Массачусетского технологического института (MIT)¹⁰ попытались усовершенствовать искусственные поверхности такого рода. Помимо своего назначения улавливать туман они могли бы иметь иное применение. Скажем, они могли бы послужить для улучшения «микрофлюидных чипов» (*«chips microfluides»*), то есть для миниатюрных систем, предназначенных для введения в полость клеток с тем, чтобы выполнить там — в мини-капсулах с микрофлюидом — сотни различных биохимических анализов.

Те же группы исследователей были вовлечены в разработки, связанные с открытым в 1990-е годы «эффектом лотоса». Лотос в Азии является символом чистоты и невинности. Он действительно отличается своей необыкновенной и постоянной чистотой, хотя растет

в заболоченных и грязных топях. Оказалось, что текстура лепестков лотоса позволяет сбрасывать любую молекулу воды, попавшую на его поверхность, а вода, скользя по поверхности листа, смывает и уносит с собой все другие вещества, встретившиеся на ее пути. Это растение поистине самоочищающееся! Вот удачная находка для фасадов зданий, очистки тканей или предметов интерьера. . .

Лотос разделяет эту особенность со множеством других растений и некоторыми насекомыми. К тому же эта особенность защищает растение от различных болезнетворных бактерий. В отличие от покрытия надкрыльев жука-скарабея, поверхность лепестков лотоса полностью отталкивает воду. Это совершенно не подошло бы скарабею, поскольку капельки воды не могли бы задерживаться на его надкрыльях даже малую толику времени, они моментально испарялись бы от ветра и жары. Итак, изучая поверхность таких гидрофобных растений или насекомых под микроскопом, ученые заметили, что она имеет небольшие неровности неправильной формы, которые мешают каплям плотно прилегать к поверхности, как это происходит на совершенно ровной поверхности. Именно благодаря этим бугоркам и их взаимодействию с молекулами воды, капельки воды, по мере стекания с поверхности, уносят с собой все загрязнения и пылинки.

Создание подобного покрытия восходит к нанотехнологиям, работающим в измерениях, порядок которых приближается к миллиардной доле метра. Один исследователь¹¹ из Высшей школы физики и промышленной химии в Париже, прибегнув к этой методике, создал супергидрофобную поверхность, имеющую нанометрические шероховатости. А немецкие исследователи выпустили аэрозоль, который можно разбрызгивать на какой угодно поверхности. Аэрозоль содержит водоотталкивающий «нанопорошок», смешанный с различными восками. После нанесения на поверхность эти вещества самопроизвольно образуют микронеровности, тем самым высушивая ее. Марка «Эффект Лотоса» (*Lotus-Effect*[®]) — обозначает такие микро- и нано-структурированные поверхности, заявляя, что только они являются по-настоящему самоочищающимися. Эту символику можно заметить на оптических улавливателях, расположенных в пунктах транзитной платы на автобанах Германии.

Неровности имеют другие неожиданные свойства. Если мы возьмем один гладкий предмет, а другой — рифленый бороздками и запустим их в воде с одинаковой силой, то какой из них будет двигаться быстрее? Конечно, второй. Трение такого предмета с водой будет существенно меньшим, поскольку вода собирается в бороздки на поверхности предмета и не образует микровихрений, т.е. отсутствует микротурбулентность!

Лишь немногие инженеры использовали этот принцип, пока биологи не изучили достаточно тщательно шкуру акул. «Морские челюсти» заслужили этот титул еще и потому, что их эпидермис состоит из маленьких чешуек, или плакоидов (*placoides*), они расположены в шахматном порядке и по структуре сходны с зубами акул. В некоторых местах акулю шкуру используют как абразив, а в океане маленькие рыбки уверенно подплывают к хищникам, чтобы потеться и освободиться от паразитов.

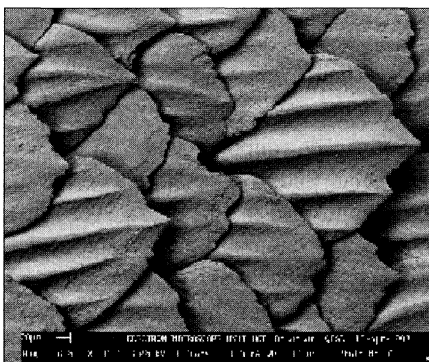


Рис. 2.13. Вид плакоидов акулы под электронным микроскопом

Каждый такой плакоид рифленый и варьирует по форме и размерам в зависимости от видовой принадлежности особи, ее пола, а также своего местоположения на теле акулы. Австралийские исследователи заметили одну закономерность, характерную для многих видов акул: в передней части корпуса бороздки на плакоидах более короткие по высоте и ширине, чем бороздки чешуек в задней

части корпуса акулы. Это максимально снижает турбулентность воды и позволяет акулам плавать очень быстро. Другое преимущество уменьшения гидродинамического сопротивления для хищника состоит в уменьшении уровня шума при перемещении в воде, что предпрещает участь добычи!

Строение плакоидов всегда соответствует их местоположению на теле, иначе они не выполняли бы столько функций. Не зря их иногда сравнивают со «швейцарскими пластиножаберными ножами»*. Такая текстура на самом деле служит для защиты акул от потенциальных суперхищников, а также от паразитов и от повреждений шкуры о каменистое дно. Плакоиды, кроме того, снабжены чувствительными рецепторами, способными выполнять мгновенный химический анализ докучливых созданий, которые прикасаются к коже акулы.

Инженеры — во всяком случае, пока — не смогли воспроизвести свойства этих дентикулов† — их способность уменьшать турбулентности и защищать от паразитов.

Первым качеством живо заинтересовались авиационные инженеры компании *Cathay Pacific*. Они провели испытания покрытия, предназначенного для партии Аэробусов А340, которое позволит снизить его аэродинамическое сопротивление на 6% и тем самым сэкономить приблизительно 350 тонн топлива в год только на одном самолете. Однако общий вес и стоимость этого преобразования во внешнем покрытии сочли слишком высокими, и описанные начинания, похоже, были заброшены. Зато в качестве реванша аналогичную структуру уже используют в форме плавательного комбинезона, названного *Speedo*. По сведениям владеющей патентом фирмы, в такой комбинезон на чемпионате мира в Шанхае в 2006 году были облачены все мировые рекордсмены обоего пола.

Второе качество дентикулов, которым заинтересовались инженеры, — их антипаразитарная функция. Действительно, эти структуры могут активно двигаться сообразно с течениями, что мешает всевозможным растительным и животным организмам прицепиться к ним. Это как раз то, что очень пригодилось бы для защиты корпуса морских судов от постоянного обрастания водорослями, которые,

*Акулы вместе со скатами относятся к подклассу пластиножаберных рыб (фр. *Elastobranches*, лат. *Elastobranchii*). — Прим. перев.

†То есть плакоидов, чья структура идентична структуре зубов. — Прим. перев.

быстро распространяясь, гасят скорость судна. Покрытие, включающее миллиарды малюсеньких неровностей размером в 15 микрон, было реализовано в Соединенных Штатах. Исследователи, кроме того, предусмотрели движение этих маленьких точек за счет легких электрических токов, это подрывает возможность развития на корпусе судна очень клейких пылинок пыльцы и спор морских организмов.

Помимо пользы для кораблей, этот проект был с энтузиазмом принят моряками, поскольку используемое сейчас антиводорослевое покрытие судов является токсичным, и эта токсичность имеет опасную тенденцию возрастать в портах.

ГЛАВА 3

СПОСОБЫ

Наблюдая Природу, мы обнаруживаем там проявления остроумия высшего порядка.

Оноре де Бальзак

Приспособление за счет структур не всегда отвечает всем ситуациям, с которыми приходится сталкиваться живым системам. Всевозможные способы, простые или мудреные, тоже вносят свой вклад в процесс выживания и вдохновляют инженеров. Мы рассмотрим здесь некоторые из них по следующим категориям: как лучше соединить; как лучше развернуться; как лучше приспособиться к разным средам и прочее.

Как лучше соединить

Одно из самых известных открытий в ботанике связано с названием *Velcro*, сочетающим части слов «*velours*» (бархат) и «*crochet*» (крючок). Этим изобретением мы обязаны швейцарскому инженеру Жоржу де Местралю (*Georges de Mestral*). Как-то на прогулке он обратил внимание на давно известный факт: головки репейника очень прочно цепляются к шерсти его собаки и к его собственной одежде, и их непросто оторвать.

Под микроскопом он смог увидеть, каким образом это растение цепляется за самые разные основы. Местралю пришла в голову идея, что можно изготовить маленькие крючочки из нейлона, напоминающие многочисленные зацепки репейника. Они ориентированы во всех направлениях, что усиливает сцепление с какой бы то ни было

опорой, и при этом гибкие, что в некоторой степени облегчает их отцепление. После нескольких усовершенствований Местраль получил патент на изобретение в 1955 году. Впоследствии эта марка распространилась по всему миру и продавалась очень успешно. Застежку *Velcro®* применяют на одежде и обуви, используют в авиации, в автомобилях, в спорте, в космосе и в больницах.

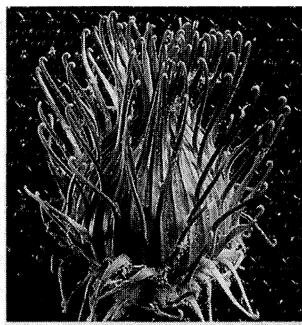
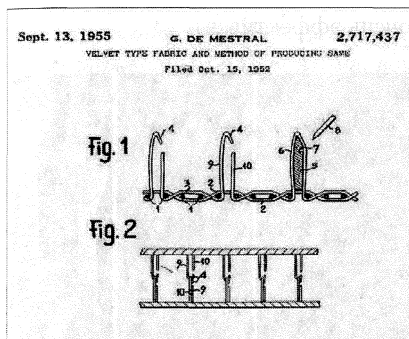


Рис. 3.1. Слева: выдержка из патента на *Velcro*. Справа: цветок репейника (лопуха). Фотография публикуется с любезного разрешения Velcro Industries B.V.

... Но не слишком сильно

Соединение *Velcro®*, безусловно, очень практично, если только не пытаться соединить, а потом расцепить две основы очень быстро. Однако этот номер проделывают без видимых усилий ползающие насекомые и ящерица геккон, когда они перемещаются по вертикальной поверхности.

Немецкий инженер Станислав Горб* (*Gorb*) тщательно изучил лапки мух. На их окончаниях находятся подушечки, или пульвиллы (*pulvilli*), — лоскутообразные дольки, покрытые микроворсинками

*Профессор Станислав Николаевич Горб родился в 1965 году на Украине, изучал биологию в Киеве, в 2002 году получил степень доктора биологических наук. В 1995 году получил премию Шлосманна по биологии и материаловедению. С 2006 года работает в научных институтах Германии и Австрии, является приглашенным профессором Вашингтонского университета. — Прим. перев. по материалам Интернета.

со своеобразными лопаточками на конце. Миллионы этих ворсинок продуцируют сладкое и маслянистое вещество, которое обеспечивает достаточное прилипание к поверхности.

Муха использует разные способы, помогающие при каждом шаге отлепиться от этой вязкой субстанции: она или слегка вращает лапкой или потирает лапками, снимая липкое вещество с помощью двух коготков на другой лапке. Этот способ прикрепления на основе так называемой влажной адгезии очень эффективен.

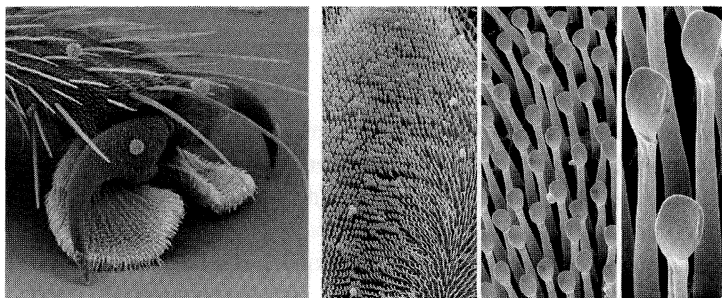


Рис. 3.2. Слева: коготки и пульвиллы (лоскутообразные дольки) на конце лапки. Справа: пульвиллы покрыты микроворсинками, заканчивающимися лопаточками. (© S. Gorb, S. Niederegger, J. Berger, Общество Макса Планка, Германия)

Ван-дер-ваальсовы связи

Слабые межмолекулярные связи названы ван-дер-ваальсовыми по имени голландского физика Иоганеса Дидерика Ван-дер-Ваальса* (*Johannes Diderik van der Waals*), получившего Нобелевскую премию в 1910 году. Это очень слабые связи, которые можно объяснить только с позиций квантовой физики, как результат обмена виртуальными фотонами между атомами. Причем их никогда не рассматривают в одном ряду с явлениями, происходящими на другом, более круп-

*В других источниках полное имя этого ученого приводят немного иначе: Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс (23 ноября 1837, Лейден — 8 марта 1923, Амстердам). — Прим. перев. по материалам Интернета.

ном, уровне: они не имеют отношения к классическим химическим связям, к обмену и распределениям электронов. Разумеется, мы здесь описываем ван-дер-ваальсовы связи очень упрощенно.

Эти связи возникают между атомами и молекулами — возникают при поляризации молекул с образованием электромагнитных диполей, то есть частиц, имеющих противоположные заряды и разделенных некоторой дистанцией, подобно двум полюсам Земли. Отрицательно заряженные электроны, которые притягиваются положительно заряженным ядром атома, вовлекаются на таком наноуровне в обмен полярностями, в соответствии с которыми они группируются в одном каком-то месте или в другом — по отношению к данному атому. Это порождает своего рода вибрации, характеризующиеся как раз частотой указанных изменений. Когда вибрации, генерируемые разными атомами или молекулами, синхронизируются, то между этими атомами или молекулами возникает притяжение (аттракция) — за счет электромагнитных сил. Если же вибрации асинхронные, происходит отталкивание. Описанные взаимодействия могут быть постоянными или временными. Ван-дер-ваальсовы силы обладают очень слабой интенсивностью — в 100 раз слабее, чем классические химические валентные связи, — но присутствуют всегда: это именно они, вместе с водородными связями, обеспечивают связность всей живой материи!

Муха и другие ползающие насекомые располагают и другим способом противостояния силе тяготения, поскольку ван-дер-ваальсовы связи — это «сухая» адгезия, без клеящего вещества, и сколь угодно перемещаемая. Но муха использует эти способы реже, чем «влажное» прилипание. Зато ящерица геккон применяет исключительно их, как это показала группа Келлара Отумна (*Kellar Autumn*) из Портленда, в Орегоне. Названная ящерица имеет сенсационные способности к адгезии. Геккон способен держаться на любой поверхности — гладкой, шершавой, мокрой или сухой, и даже удерживать вес всего своего тела на одном пальце. Он без труда прилипает к поверхности и отрывается от нее более 15 раз в секунду — таким образом, каждая операция занимает у него около 1/8000 доли секунды.

На каждом из пяти пальцев его лапки тесными рядами расположены миллионы микроворсинок, похожих на те, что есть у мух, но у геккона каждая микроворсинка оканчивается примерно 1000 маленьких лопаточек, диаметром порядка 0,5 микрона. Всякая микроворсинка имеет определенную ориентацию и, таким образом, применяется к любой опоре, контакт каждой нано-лопаточки максимизируется за счет возникновения превосходных сил притяжения Ван-дер-Ваальса. Очень слабые на уровне атома, эти силы становятся колоссальными, когда они исходят из множества элементов. За счет этого все микроворсинки лапок геккона могли бы выдержать вес около 130 кг.

Самое удивительное, что ящерица отрывает лапки так же быстро, как «приклеивает» их к опоре. Когда она ставит лапку, то микроворсинки становятся жесткими (прямыми), тем самым увеличивая прилипание лопаточек. Когда геккон поднимает лапку, микроворсинкигибаются и становятся мягкими, и лопаточки образуют угол 30° по отношению к опоре, что разрывает ван-дер-ваальсовы связи. Это походит на то, как мы обычно отрывает клейкую ленту от опоры, поворачивая ее перпендикулярно поверхности (а приклеивая, накладываем параллельно поверхности).

Аналогичные свойства присущи поверхностям с любым химическим составом, если они разделены на наноскопические элементы, воспроизводимые в огромном множестве экземпляров и гибкие. Добавим к этому, что лопаточки на микроворсинках являются водоотталкивающими — как неровности на листе лотоса, описанные выше. Таким образом, сухая и перемещаемая адгезия лапок геккона к тому же и самоочищающаяся!

Исследователи из университета Беркли (*Berkeley*) и колледжа Льюиса и Кларка в Портленде (*Lewis & Clark College*)¹², в сотрудничестве с другими американскими учеными, разработали ленту (повязку), сделанную из полипропиленовых волокон, каждое из которых имеет длину 20 микрон и диаметр 0,6 микрона, т.е. в 100 раз тоньше человеческого волоса. На одном квадратном сантиметре ее поверхности находится 42 миллиона таких волокон. Адгезия возникает за счет изменения геометрических и механических качеств этих нановолокон при сближении с поверхностью. Пока эта разработка воплотилась лишь в моделях игрушечного геккона и робота.

Исследователи тщательно взвешивали возможность создать достаточное количество этого покрытия, чтобы подвесить какого-нибудь студента в проеме одного из окон самого высокого здания их университета, дабы публично подтвердить результат своей работы, но получили отказ из-за недостатка доверия... по крайней мере, добровольцев не нашлось!

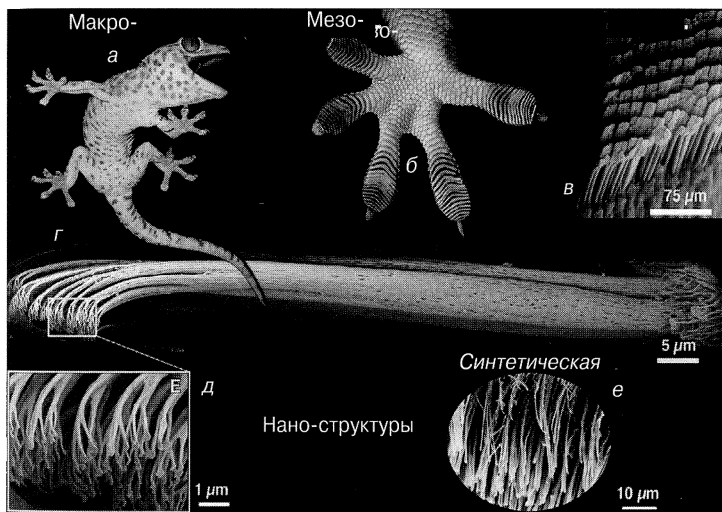


Рис. 3.3. а: геккон; б: одна из его лапок; в: микроворсинки, расположенные на каждом пальце; г, д: разветвленные присоски (лопаточки) на концах каждой микроворсинки; е: синтетическое воплощение. (© Kellar Autumn, Lewis & Clark College, Портленд) (См. цветную вклейку)

Среди будущих проектов применения таких адгезивных материалов рассматривают возможность покрывать ими подметки спортивной обуви. Тогда профессиональные спортсмены, например, не снизят своих достижений в дождливую погоду. Материал пригодился бы для обуви космонавтов: во время ремонтных работ или проверки оборудования они смогли бы разгуливать по стенам своего космического корабля.

Остается разрешить по крайней мере одну проблему: когда две липучие полоски оказываются слишком близко, они слипаются между собой. Однако, вспоминая ящерицу, никто никогда не видел слипшиеся между собой лапки геккона, так что секрет сухой адгезии пока не раскрыт¹³ до конца!

Как лучше развернуться

... Чтобы развиваться дальше

Искусство сворачивания или складывания в природе демонстрируют листья в почках, бутоны цветов, куколки насекомых, чтобы потом развернуть листики, распуścić лепестки или расправить крылышки. Скажем, божья коровка использует его ежедневно для защиты тонких перепончатых крылышек под двумя жесткими надкрыльями. При этом хрупкие и достаточно большие поверхности остаются невредимыми, несмотря на необходимость быстрого развертывания. Человечество, видимо, начало практиковать складывание примерно 3000 лет назад — приблизительно дата создания первой известной складной карты.

В 1970 году японский профессор Корио Миура (*Koryo Miura*) из Института научной аэронавтики и космоса заинтересовался природными методами с целью проверить математически, как делать «жесткие» оригами, в которых стенки между складками не искривятся (не согнутся) во время складывания. Один лист бумаги, приготовленный таким образом, переходит от минимального размера к максимальному, и наоборот, если просто потянуть его за два противоположных угла. И эту манипуляцию можно проделывать множество раз без малейшего риска повреждения складок. Обычно лист бумаги складывается прямоугольными складками. Однако Миура придумал способ, который он позаимствовал у листа граба: складки образуют по отношению друг к другу острые углы, и любое действие с одной складкой передается на другие. Это обеспечивает устойчивость ребер и твердость стенок между складками бумаги, что позволяет легко и непринужденно выполнять частичное свертывание.

Такой способ оценит любой, кому приходилось пользоваться дорожной картой.

Под названием сложения методом Миуры, или Миура-ори («*Miura-ori*»), было запатентовано множество воплощений — от очень простых до весьма сложных, — разработанных в лабораториях и на предприятиях во всем мире.

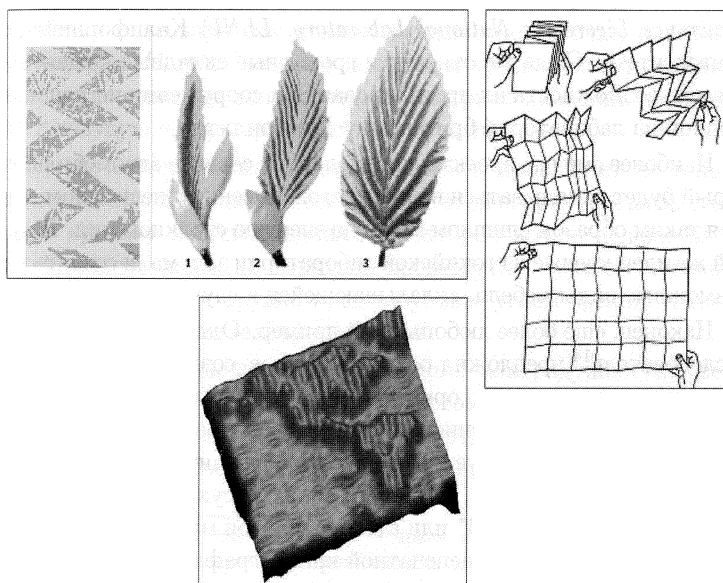


Рис. 3.4. *Вверху:* разворачивание листа граба напоминает складки Миуры (метод «Миура-ори»). (© Lakshminarayanan Mahadevan, Гарвардский университет.) Лист бумаги можно сложить и развернуть, даже не меняя положения пальцев. *Внизу:* карта Америки с использованием молекулярного оригами. (© Paul Rothemund, California Institute of Technology)

Возьмем, к примеру, проблему складывания панелей солнечных батарей*. Их большая отражательная поверхность естественным образом бомбардируется фотонами и освобождает космические средства передвижения от необходимости везти большой груз горючего при

*Панелей, используемых для получения электроэнергии в космосе. — Прим. перев.

оборотах вокруг Солнца. Они могут простираться вширь на 20 метров и притом бывают примерно в 20 раз тоньше листа бумаги, что, разумеется, затрудняет их разворачивание с момента взлета. Среди других практических приложений, подразумевающих этот тип сложения, вспомним переносной (передвижной) телескоп, который разворачивается, как цветок, без всякого двигателя. Он был задуман в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (*Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL*) Калифорнийского университета. Сюда же относятся громадные складные крыши или навесы, возможность их проектирования и сооружения исследовали в одной из лабораторий британского Кембриджа.

Наиболее смелые проекты предполагают создать автомобиль, который будет складываться в случае столкновения с пешеходом, снижая таким образом слишком мощную энергию столкновения. В духе той же идеи ученые из токийской лаборатории задумали создать всевозможные виды мебели, складывающейся в случае землетрясения.

Наконец, еще более любопытный пример. Один калифорнийский исследователь¹⁴ предложил рецепт рисунков, создаваемых с использованием молекулярных оригами: искусное складывание цепочек ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты) на уровне некоторых ковалентных связей образует рельеф, позволяющий, например, представить карту Америки... Правда, такие рисунки можно увидеть только через туннельный* или атомно-силовой микроскоп†. Эти методы перспективны для непечатной криптографии.

... И изменить цвет

Бабочки принадлежат к отряду чешуекрылых насекомых (*Lepidoptera*, от греческого «*lepidos*» — чешуйки). Они расправляют свои

*Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ, англ. *STM* — *scanning tunneling microscope*) — вариант сканирующего зондового микроскопа, предназначенного для измерения рельефа проводящих поверхностей с высоким пространственным разрешением. — ru.wikipedia.org

†Атомно-силовой микроскоп (АСМ, англ. *AFM* — *atomic-force microscope*) — сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения. Используется для определения рельефа поверхности с разрешением от десятков ангстрем вплоть до атомарного. — ru.wikipedia.org

крылышки в момент метаморфоза, используя тот же способ, какой был описан выше. Несмотря на полное отсутствие красящих пигментов, крылышки некоторых видов бабочек сверкают необыкновенными цветами. Это объясняется определенной тонкой структурой их чешуек, которая порождает переливы света за счет явлений световой интерференции и дифракции. Этот феномен переливчатости называют *иризацией** (*iridescence*).

Именно благодаря ему южно-американские бабочки подсемейства морфид (*Morphos*[†]) одним движением крыльев могут поменять цвет с коричневого на великолепный электрически-синий, переходящий в голубую лазурь при малейшем переливе света.

Однако сияющий синий цвет крылышек привлекает не только партнеров, но и хищников. Во избежание этой неприятности быстрое биение крыльев и беспорядочная траектория полета делают бабочек видимыми лишь на короткие промежутки времени и только под определенным и трудно предсказуемым углом зрения, что существенно осложняет задачу хищников.

Такой способ использования *иризации*, или радужности, света был подробно изучен большим специалистом в этой области Сержем Бертье (*Berthier*)¹⁵ из Института нанонаук Университета Paris 7. Он был приглашен ученым сообществом в Сан-Франциско, чтобы представить

* «Иризация (от греч. *iris* — радуга) — яркая игра цветов (цветовой отлив или блик) на гранях кристаллов или плоскостях спайности некоторых минералов, например, иризирующих полевых шпатов (лабрадора, адуляра и др.). Обусловлена рассеянием света в кристаллах, построенных из субмикроскопич. паралл. пластинчатых индивидов, определ. образом ориентированных». — *Большой энциклопедический политехнический словарь*, 2004.

[†] Морфиды представлены всего одним родом (*Morpho*), правда, в нем насчитывается более полутора десятков видов. Эти крупные бабочки достигают в размахе крыльев 150–180 мм. Верхняя сторона их крыльев окрашена в сине-голубые сильно переливающиеся металлические цвета. Своей красивой окраской морфиды обязаны оптическим чешуйкам, которыми покрыто крыло. Нижняя часть их пигментирована; пигмент не пропускает света и тем самым придает большую яркость интерференционной окраске ребер. В соединении с крупными размерами бабочек это приводит к тому, что при ярком солнечном освещении каждый взмах крыла виден за треть километра. Морфиды относятся к самым заметным насекомым, населяющим леса тропической части Амазонки. — *Прим. перев. по материалам сайта: <http://www.danaida.ru/>*

последнее поколение плоских экранов *iMoD* (*interferometric MoDulator*), в основе которых лежит отражающая металлическая мембрана, покрытая нанозеркалом с плотностью 80 000 мини-зеркал на квадратном сантиметре экрана. Когда электрическое напряжение прилагают между мембраной и зеркалом, электростатическая сила наклоняет зеркало в трех разных позициях, которые воспринимаются как три основных цвета — красный, синий и зеленый. Когда наклона не происходит, экран выглядит черным. Такой экран точно передает цвета, а разрешение изображений выше, чем на обычных экранах. К тому же он потребляет десятую часть энергии, необходимой для работы жидкокристаллического экрана, поскольку зеркало отражает окружающий свет, а не искусственный белый свет, испускаемый источником позади экрана. Вот почему эта технология широко применяется в мобильных телефонах, ведь обычные экраны потребляют примерно 30% всей энергии телефонных аккумуляторов.

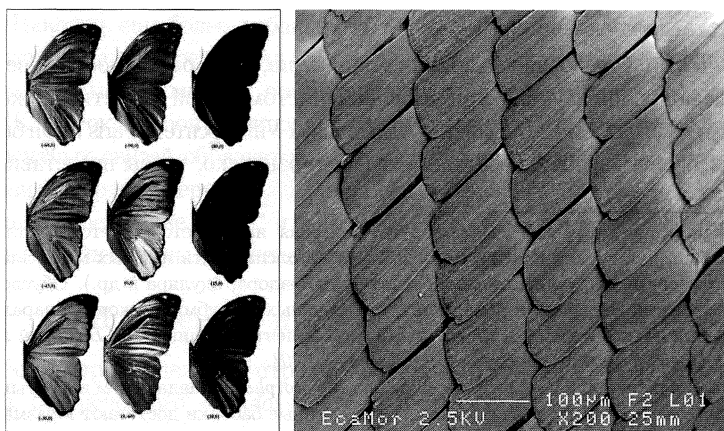


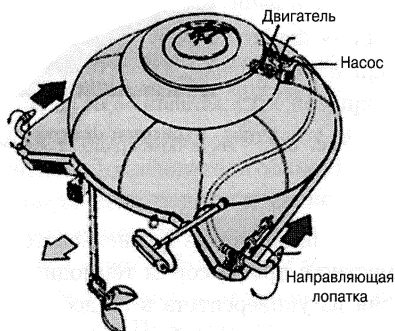
Рис. 3.5. Крылья и чешуйки бабочек подсемейства морфиды. Слева: изменение цвета крыльев одной из бабочек рода *Morphos* (фото из работы Сержа Бертье (*Berthier*) «Иризация, физические цвета насекомых», опубликованной *Springer France*, Париж, 2003). Справа: чешуйки чешуекрылых; вид под электронным микроскопом с разверткой. (© *Joseph Le Lannic — CMEBA, Université Rennes 1.*) (См. цветную вклейку)

Как лучше обращаться с жидкостями и газами

... И притом погружаться, как моллюск-кораблик

Жизнь зародилась в океане, и вполне очевидно, почему некоторые живые системы служат источником поучительных методов распространения в жидкой среде. В частности, инженеров интересуют некоторые способности разнообразных головоногих моллюсков (лат. *Cephalopods*), которые позволяют им процветать. Правда, моллюск-кораблик (наutilus) был очень распространен во вторичном геологическом периоде, но в наши дни представлен мало. Это охотник глубин Тихого и Индийского океанов. По мере своего роста он создает очередной этаж (камеру) собственной раковины — более просторный, чем предыдущий, — и живет в нем. Пустые ложа его камер заполнены смесью воды и газа. Для этого используется сифон, который проходит через все «этажи» наutilusа. Чтобы переместиться, он стремительно приводит в движение газ в своих камерах. При этом вода выбрасывается, создавая реактивное движение, требующее мало энергии и очень эффективное. Чтобы погрузиться глубже — глубина погружения кораблика может достигать 400 метров — или, наоборот, подняться ближе к поверхности, он изменяет пропорцию водно-газовой смеси в своих отсеках.

Рис. 3.6. Ныряющее блюдце Ива Кусто



Именно этот метод был использован в «ныряющем блюде» (фр. *soucoupe plongeante*) — малом подводном аппарате команды Кусто для погружений в мир тишины...

... Или прицеливаться, как жук-бомбардир

Это — очень примечательное насекомое. Он имеет совершенно уникальную систему защиты, которая позволяет ему выбрасывать за несколько миллисекунд очень раздражающую, вонючую жидкость температурой 100 °C! Такая скорость тем более необыкновенна, что описываемая жидкость предварительно смешивается, будучи секретом двух разных желез жука, причем смесь должна быть выполнена только в последний момент. Эта операция производится с небольшим участием воды — в настоящей реакционной камере, или камере сгорания, объемом в 1 мм³. А стрельба жука — очень меткая, поскольку жук способен направлять ее на цель с помощью небольших выростов на кончике брюшка, которые он может ориентировать по желанию.

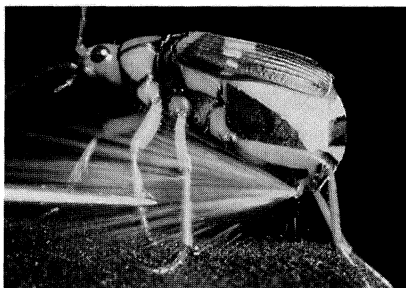


Рис. 3.7. Жук-бомбардир стреляет раздражающей жидкостью

Один биолог из Корнельского университета сейчас работает совместно с профессором термодинамики и теории внутреннего сгорания из университета в Лидсе¹⁶, стремясь скопировать у животных принцип двигателей внутреннего сгорания. Они пытаются таким образом разрешить проблему газового питания турбин самолета. Причем

так, чтобы подачу топлива можно было быстро прекращать во время полета — в случае, например, экстремально низких температур. Первые достигнутые заключения отмечают, что форма реактивной камеры (камеры сгорания) у жука-бомбардира имеет важнейшее значение для увеличения количества выбрасываемой жидкости и частоты ее выброса. Форма «жиклера» (форсунки) тоже очень существенна для меткой стрельбы.

Как распространять звуки

... И коммуницировать подобно дельфинам

Выше мы говорили, что изобретение сонаров не было заимствованием у Природы. Однако метод, которым животные производят звуковые волны, послужил источником многих других практических приложений. Дело в том, что эти «механические» волны в данном случае подходят гораздо лучше, чем волны электромагнитные. Первые позволяют успешно передавать информацию в океанической среде, а вторые на глубине очень ослабевают. В этом смысле нет ничего более удивительного, чем слушать «разговор» между дельфинами. Коммуникация дельфинов вдохновила двух немецких инженеров¹⁷ из Министерства образования и научных исследований на разработку эффективной системы звуковой подводной коммуникации.

Дельфины издают два типа сигналов. Эхолокационный «клик» служит у них для определения препятствий и ориентации в пространстве, а более разнообразные сигналы — свисты, скрежет, пронзительные крики — для общения с соплеменниками. Сигналы второго типа были особенно хорошо изучены. Исследователи обнаружили, что, чтобы такой сигнал можно было ясно понять и распознать, кто именно его посылает, дельфины изменяют частотную гамму, в пределах которой они передают свои свисты. Благодаря этому их сигналы многообразны и очень индивидуальны, и отдельные особи прекрасно распознают сигналы друг друга. По такому же принципу был разработан первый прототип подводного модема, позволяющий

отправлять 5 килобайт ясных звуковых сообщений в секунду на расстояние 3,5 километра.

... Или улавливать звуки, как сова

Известно, что «небольшой шумок» где-то в автомобиле, источник которого не удастся определить, очень раздражает большинство автомобилистов. Совы могли бы помочь разрешить эту трудность. При этом они вдохновили исследователей на создание множества других практических вещей, несомненно даже более важных! Эти ночные птицы способны выслеживать свою добычу благодаря своей очень восприимчивой зрительной системе — ее чувствительность к свету в 100 раз выше, чем у человека. Однако и слух сов тоже обеспечивает им прекрасные результаты. Действительно, совы способны охотиться в полной темноте, а также улавливать малейшие звуки, издаваемые мышами под снегом. . .

Слуховые проходы у сов находятся позади «лицевого диска», т. е. характерной маски из перьев вокруг их глаз. Сей факт имеет существенное значение, поскольку перья диска подвижны и позволяют регулировать ширину ушных щелей, создавая оптимальный режим приема звуковых волн. Направляясь точно в слуховые проходы, звуковые волны усиливаются с преимуществом примерно в 10 децибел (т. е. воспринимаемый звук слышен громче на 10 децибел). Такая сверхчувствительность позволяет птицам точно определять расстояние, на котором находится жертва. Местонахождение добычи оценивается тоже очень хитрым способом. Звук приходит в одно, а затем в другое ухо с разницей во времени примерно в 0,0002 секунды, этого оказывается вполне достаточно, чтобы птица точно повернула голову в нужном направлении. Восприятие упомянутой разницы усиливается за счет анатомических особенностей: асимметричного расположения внутреннего и наружного уха или разной высоты размещения правого и левого слухового отверстий. Такие особенности описаны у разных видов сов. Кроме того, едва заметные повторяющиеся боковые движения головы совы тоже способствуют различению разницы между приходящими звуками.

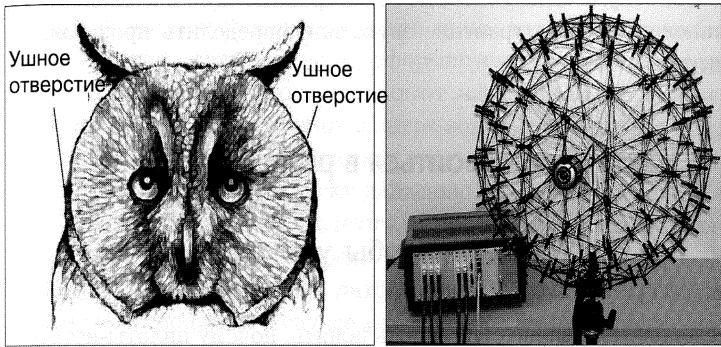


Рис. 3.8. Слышать, как хищная птица... Слева: лицевая маска и асимметричное расположение ушных отверстий у некоторых ночных хищников. Справа: сферическая «акустическая камера», идея которой заимствована у слуховой системы этих птиц. (© GFal Tech, Берлин)

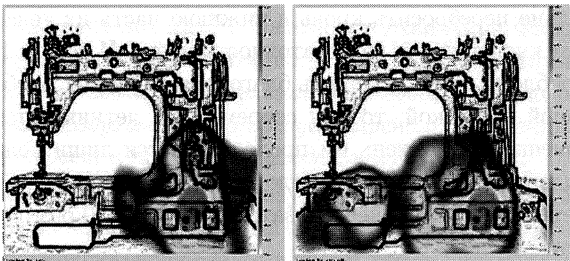


Рис. 3.9. «Звуковая картинка» швейной машинки. Слева: во время исправной работы. Справа: имеется проблема в бобинном устройстве машинки — грейферном гнезде. (© GFal Tech, Берлин; Azilane Instruments, Nozay)

Берлинское сообщество *GFal* создало и выпустило в продажу акустические камеры, вдохновленные принципами строения слуховой системы этих хищных птиц. Камеры снабжены множеством микрофонов — их около 120, — которые улавливают звуки, издаваемые на расстоянии от 30 см до 300 метров. Все это обрабатывается компьютером, который накладывает визуальную картинку мишени на ее «звуковую картинку». Этот принцип применяли, например, чтобы

узнать, откуда может исходить посторонний шум в машине — дабы установить распространение звука или определить происхождение неисправности.

Как лучше освоиться в разных средах

... В воздухе — чтобы ускоряться, как стрекоза

Исследователи давно стремились понять, почему пилоты-истребители последней войны имели визуальные проблемы: у них возникало выпадение зрительной картинки как раз в момент, когда они должны были бы быть максимально бдительными, а именно сразу после ускорения во время преследования вражеского самолета. На самом деле, давление, которое при этом испытывают пилоты, может настолько стремительно перебросить кровь в нижнюю часть их тела, что это порождает кислородную недостаточность мозга. И если в 1960-е годы эту проблему удалось решить благодаря созданию комбинезонов с воздушной подушкой, то для современных летчиков такой прием совершенно бесполезен: им предоставляется лишь полсекунды, чтобы выдержать ускорение самолета-истребителя равное $10g^*$, что заставляет все их органы испытывать нагрузку, в 10 раз превышающую их собственный вес.

Вот почему «метод стрекозы» заинтересовал швейцарских и немецких изобретателей, когда они изучили, каким образом это насекомое оказывается способным выдерживать ускорение в $30g$. Дело в том, что органы стрекозы имеют одну особенность: они «плавают» в крови насекомого, которая циркулирует без вен и артерий. Сердце стрекозы имеет форму трубки и постоянно приводит в движение жидкость, окружающую его и другие органы — они вместе противостоят молниеносным изменениям скорости. Однако наполненный водой комбинезон *Libelle G-Multiplus*, задуманный по этому принципу, появлялся на свет медленно, потому что надо было найти подходящие

*Речь идет об ускорении свободного падения.

материалы и проявить находчивость, чтобы пилоту не приходилось носить на своем теле содержимое целой ванны воды! Проблема была решена за счет размещения на недеформируемой одежде маленьких наполненных водой полосок, идущих от плеч вплоть до лодыжек, причем в них содержалось лишь 2 литра воды. В момент значительного ускорения вода в этих полосках перемещается по направлению к ногам, оказывая контрэффект давлению на все части тела и перенаправляя кровь вверх — к мозгу, и притом немедленно. Кроме того, разработчики предусмотрели такую возможность: этот защитный костюм с запасом воды 2 литра может помочь пилоту решить проблему питьевой воды в случае экстренного катапультирования. . .

... Или в воде, и притом остаться сухим, как паук!

А точнее — как водяной паук-серебрянка (лат. *Argyroneta aquatica*)¹⁸, он вдохновил немецкого исследователя из той же лаборатории, где открыли «эффект лотоса»¹⁹. Энтомолог Жан-Анри Фабр (*Fabre*)* описал серебрянку очень поэтично: «*Argyroneta создает под водой, с помощью шелковой нити, элегантный водолазный колокол и заполняет его воздухом — это предусмотрено для дыхания, и серебрянка выжидает в прохладе прихода добычи*»²⁰.

Будучи исключением среди пауков, серебрянка ведет полностью водный образ жизни. Однако легкие этого паука не позволяют ему дышать кислородом под водой — в пруду, где он живет[†]. Серебрянка вынужден ткать своеобразный «водолазный колокол из шелка», рас-трубом вниз, и наполняет его воздухом, поднимаясь на поверхность воды, курсируя туда и обратно множество раз. Чтобы забрать воздух с поверхности воды, он поворачивается головой вниз и использует свои лапки для захвата малюсеньких шариков воздуха, который застревает на миллионе волосков, покрывающих тело серебрянки. Каждый раз он переносит немного воздуха в свое жилище и притом

*Жан Анри Фабр (*Jean Henri Fabre*, 1823–1915) — французский энтомолог и писатель.

†Водяной паук попадает в стоячих или медленно текущих водах довольно часто. — *Википедия*.

остается совершенно сухим после этого путешествия благодаря своему воздушному мантию*. Именно эта особенность заинтересовала исследователя. Коллегиальное содружество с Институтом текстиля и технологических процессов Данкендорфа позволило ему разработать ткань, способную пассивно (без каких-либо энергетических вмешательств) захватывать в себя окружающий воздух. И притом эта ткань остается сухой после четырехдневного пребывания в воде — что в 10 раз дольше, чем любая другая из ныне существующих тканей. Возможные применения этой находки весьма разнообразны, начиная от производства сухих купальников, предотвращающих гипотермию†, и до покрытия судов либо трубопроводов — ради уменьшения трения жидкости, циркулирующей вдоль корпуса судов либо, соответственно, в трубах.

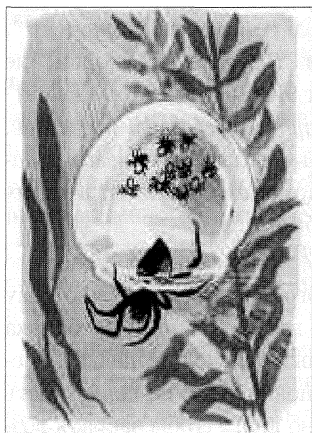


Рис. 3.10. Элегантный водолазный колокол серебрянки

*Как раз благодаря этому «воздушному мантию» паук выглядит серебряным под водой. — Прим. перев. по материалам Википедии.

†Переохлаждение.

ГЛАВА 4

МАТЕРИАЛЫ

*Природа творит вариации и копирует.
Техника копирует и создает вариации.*

Блез Паскаль

Мы обсудим здесь лишь несколько наиболее репрезентативных материалов — показательных в плане современных исследований, хотя количество нынешних разработок велико.

Адгезивный продукт — еще один!

Методы влажной и сухой адгезии, перенятые у насекомых и геккона, мы уже описали в предыдущей главе. Поиски Граалева чаша адгезивных материалов восходят к эпохе неолита — эпохе, когда использовали натуральный битум (смола), чтобы соединить костяной наконечник с древком стрелы. В Древнем Египте, 3500 лет назад, существовали свои рецепты клеев из растительного и животного сырья. А в XV веке уже западная цивилизация ради книгопечатания и переплетного дела должна была найти натуральные клеящие вещества, такие как яичный белок и сок акации. Последующее развитие индустрии привело к необходимости искать другие источники клеящих субстанций и придумывать синтетические адгезивы. При этом инженеры стремятся создать продукт, который может склеивать самые разные материалы-основы в любых средах — воздушных и водных — и которые будут присоединять мгновенно и позволят так же мгновенно переклеить заново, к тому же будут биоразлагаемыми и без содержания токсичных веществ.

...Как это делает златоглазка

Один суперклей, устойчивый в воздушной среде и без содержания каких бы то ни было токсичных включений, уже производится на протяжении нескольких сотен миллионов лет... Его производит недооцененное насекомое с золотыми глазками — хризоба (*chrysopa**). В течение своего репродуктивного цикла самка златоглазки откладывает около 1000 яиц, которые она аккуратно размещает одно рядом с другим на стеблях или листьях растений. Каждое яйцо закреплено на ножке длиной 1 см, служащей креплением к опоре и одновременно отводящей влагу. Эта ножка «приклепана» к основе капель жидкого клея, моментально отвердевающего при контакте с воздухом. Однако до настоящего времени секрет этого эффективно и «чистого» продукта остается неясным...

...Или как голубая мидия?

Зато секрет клея, который затвердевает под водой и может противостоять сильным водным течениям, уже почти дешифрован. Этот очень цепкий и прочный адгезив вырабатывает голубая съедобная мидия (*Mytilus edulis*[†]), чтобы прикрепиться с помощью своего раковинного шелка — его волокна отходят от раковины мидии — к абсолютно любой опоре, и притом в соленой воде. Такое вещество необычайно интересует хирургов, офтальмологов и зубных врачей. Они могли бы использовать этот продукт для восстановления органических повреждений в среде живого организма — такой же водной и соленой, как морская вода.

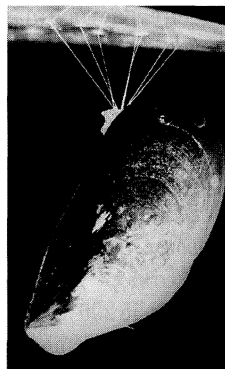
В состав этого продукта входят различные протеины. Один из этих белков готовит опору, второй является основой самого клея, другие белки формируют нити раковинного шелка, еще один защищает эти нити от бактериального разрушения. Шведские исследователи

*Хризоба (*Chrysopa*) — род насекомых из отряда сетчатокрылых (*Neuroptera*), называемый также флерницей и златоглазкой. — *Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона*

[†]Голубые мидии представлены тремя видами: мидией средиземноморской (*Mytilus galloprovincialis*), мидией тихоокеанской (*Mytilus trossulus*) и самой известной и распространенной — мидией атлантической, или съедобной (*Mytilus edulis*). — По материалам Интернета.

получили хорошо очищенный продукт — 10 000 мидий поставляют всего 1 грамм этого вещества, — но встретились с огромной проблемой: его невозможно было отклеить с помощью тех инструментов, которые позволили бы его добывать!

Рис. 4.1. Голубая мидия и ее раковинный шелк
(© Herbert Waite, Университет Калифорнии, Санта-Барбара)



Один исследователь из Лесного колледжа Орегонского университета²¹ предпочел подступиться к проблеме под другим углом. Установив, что клеящие свойства протеина раковинного шелка обеспечиваются большим содержанием гидроксида фенола, он пришел к идее ввести этот тип молекул в... тофу — тот самый соевый продукт, который очень популярен в Соединенных Штатах. Таким способом ученый получил очень конкурентоспособный адгезив, сравнимый фенолформальдегидными смолами. Эти смолы, хотя и широко употребляемы, скомпрометированы как вещества, оказывающие на человеческий организм сильное раздражающее воздействие и к тому же канцерогенные. На настоящий момент созданный материал адаптирован для склеивания древесины. Причем фанера и деревянные панели получаются гораздо более устойчивыми к влаге даже после длительного пребывания под горячей проточной водой.

Эластичный продукт

... Прочнее стали

В 1709 году Франсуа Ксавье Бон де Сен Илэр (*Hilaire*) — первый президент Счетной палаты Лангедока, «отдела Жизни и Финансов»*, представил перед академиками Монпелье митенки и чулки из нитей паутины. Он хотел наладить индустриальное производство таких вещей и написал диссертацию на тему: «Паутина, заключающая в себе Достоинство и Собственность этого насекомого, качество и применение производимого им шелка и получаемых из него Капель для исцеления от Апоплексии, Летаргии и всех болезней сна (*maladies Soporeuses*)». Тем временем физик и натуралист Рене Антуан Фершо де Реомюр† довольно быстро рассеял иллюзии диссертанта: требуется 55 296 пауков, чтобы их секреторные железы произвели 500 граммов такого шелка, при том что всего 2500 гусениц шелкопряда с успехом выполняют эту задачу. Кроме того, придется ловить миллиарды мух, чтобы кормить наемных рабочих. Однако одежда из этого материала все же была соткана на Мадагаскаре в конце XIX столетия, где один миссионер учредил ремесленную школу ткачества, для которой нить поставляли пауки *Halabé*. Выпускавшиеся в этом ателье платья были удостоены титула лунного платья из ослиной шкуры‡.

Этот материал не только весьма эстетичен. Биоволокно, из которого он состоит, — легкое и мягкое и в 40 раз тоньше человеческого волоса. Оно к тому же вчетверо прочнее стали и гораздо эластичнее, чем синтетическое волокно *Kevlar®*, из которого изго-

*Здесь авторы в кавычках приводят его практически неперевожимый титул: президент «*Survivance de la Cour des Comptes, Aydes & Finances de Languedoc*». — Прим. перев.

†См. прежнее упоминание о нем и постраничное примечание в самой первой статье главы 1. — Прим. перев.

‡«Ослиная шкура» (фр. *Peau d'Âne*) — сказка Шарля Перро, впервые опубликованная в 1694 году. Повествует о том, как вдовец-король решил жениться на своей дочери, но та из страха перед инцестом бежала из дворца, одевшись в ослиную шкуру. Сказка вошла в сборник «Сказки матушки Гусыни» и неоднократно экранизировалась. — По материалам Википедии.

товляют пуленепробиваемые жилеты. Кабель из волокон паутины толщиной с большой палец способен выдержать 10 автобусов и остановить самолет на лету — такие результаты недоступны ни одному другому природному материалу, в том числе производимому гусеницами тутового шелкопряда. Помимо всего прочего, нить паутины наделена «аутопамятью формы», иначе говоря, она способна восстановить свою начальную конфигурацию без какой бы то ни было внешней стимуляции. Это качество хорошо изучили исследователи из университета Ренне, именно оно объясняет, почему паук, когда он, спускаясь с паутины, подвешивается на своей нити, не вращается на ней.

Подобные качества могли бы быть особенно полезными, скажем, для рыболовной лески, альпинистского троса, оптических волокон, для изготовления шовного материала в кардиологической и глазной хирургии и даже ради того, чтобы заменить искусственные ткани органическими.

Ископаемые находки показывают, что пауки ткут свою паутину на протяжении 380 миллионов лет. Они наделены специальными железами — числом от 6 до 9, — специализированными для определенного вида нитей. Большинство специализированных волокон предназначено для плетения паутины, одно — для опутывания жертвы, одно для коконов и т. д. По мнению исследователей Федеральной политехнической школы Цюриха, каждая нить состоит из одного пучка тонких волоконцев, а каждое волоконце сформировано из множества протеиновых цепочек. Причем состав волоконцев чередуется полосами: упорядоченная полоса белковых цепочек укрепляет волоконце, делает его прочным и мощным, а следующая полоса мало структурированных белковых цепочек придает волоконцу эластичность. Однако разрешение загадки свойств паучьих нитей состоит не только в их строении, но и в том способе, которым животное* их вырабатывает: паук чередует продукцию волокнистого белка с продукцией другого белка — регулирующего отвердение предыдущего на воздухе. Этот способ производства нитей еще пока не прояснен полностью.

* Авторы умышленно не называют пауков насекомыми, поскольку, как известно, эти животные не относятся к отряду насекомых, а принадлежат к паукообразным (вместе с клещами, вшами и некоторыми другими малоприятными для нас созданиями). — *Прим. перев.*

Самое естественное решение, которое позволило бы получать прекрасный трос, — надо наладить поточное производство паучьего секрета. Но это оказывается невозможным по многим причинам: начиная от мало приветливого отношения этих животных друг к другу и до значительных издержек на оборудование, требуемое для приспособления к этой черте характера пауков. Однако некое искусственное решение уже было найдено. Это, например, проект канадского предприятия «Нексия Биотехнологии» (*Nexia Biotechnologies*), где выращивают трансгенных коз, вырабатывающих молоко, содержащее идентифицированные белки. Эти белки очищают и пропускают под давлением через микроскопическое сито. В результате получают пучки волоконца очень похожие на желаемые нити. Однако с волокном под названием *BioSteel*[®], пока еще возникает слишком много проблем, что не позволяет пустить его в эксплуатацию.

Исследователь из Тафтского (*Tufts*) университета в Соединенных Штатах²² пытается обойти трудности создания специального волокна, соединив в одном продукте два клонированных гена: ген паука, отвечающий за производство одного волокнистого и мягкого белка, с геном двухатомной водоросли, снабженным кремнием, который мог бы обеспечить прочность.

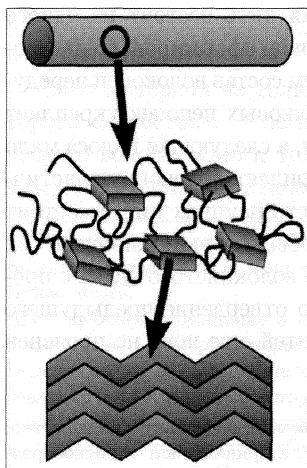


Рис. 4.2. Одна нить паутины (*верху*) содержит жесткие волокна (изображены параллелепипедами), они разделены мало структурированными участками (изображены черными связками в центре рисунка), придающими паутине характерную мягкость и эластичность. Жесткие участки организованы таким образом, что взаимно усиливают свою прочность (*внизу*)

Помимо таких очень дорогостоящих трансгенных методов решения проблемы, исследователи идут другим путем. В частности, группа²³ ученых из Массачусетского технологического института (MIT) пытается синтезировать полимеры совсем иной, чем паутина, природы, но способные имитировать особенности этого поистине загадочного материала — одновременно прочного и эластичного.

... И снабженный нано-рессорами

Представьте себе человека, находящегося в подвале своего дома, который вдруг одним скачком достигает балкона на 100-м этаже этого дома. На самом деле он мог бы сделать это самым естественным образом, если бы его сухожилия были из резина (résiline). Это то самое невероятно упругое вещество, которое позволяет блохе совершать прыжки, по высоте примерно в 150 раз превышающие ее размеры, а какой-нибудь мухе позволяет бить крылышками 500 миллионов раз за время ее жизни.

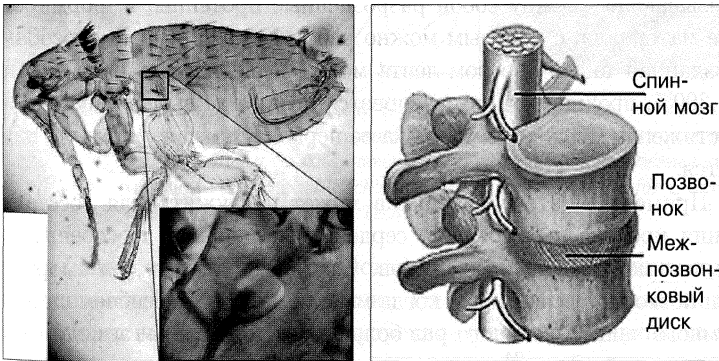


Рис. 4.3. Слева: одна капля резина в сочленениях ножек блохи позволяет блохе совершать столь колоссальные прыжки. (© Dave Merrit, University of Queensland, Brisbane.) Справа: расположение межпозвоноковых дисков в нашем позвоночнике

Этот ультраэластичный продукт обязан своими качествами тому факту, что возвращает 99% энергии, которая к нему приложена, тогда как если взять присутствующий в наших суставах эластин или,

скажем, полибутадиен (лучший синтетический каучук в мире), то они выдают 90 и 80% приложенной энергии, соответственно. В отличие от двух упомянутых веществ, резилин очень долго сохраняет свою упругость, то есть способность восстанавливать свою первичную форму после деформации. Это качество особенно полезно для насекомых, поскольку в их организмах запас резилина никогда не обновляется с момента своего появления в самом начале их развития.

Рассматриваемый протеин основывается главным образом на одной аминокислоте. Речь идет о пролине*. Его своеобразие в том, что он «коленчатый». Это помогает молекулам сгибаться, подобно пружинам (рессорам). Невозможно получать его в достаточном количестве от насекомых. Поэтому разработчики *CSIRO* — конструкторского отдела Университета Квинсленда (*Queensland*) и из Национального университета Австралии пытались получить раствор с такими молекулами при участии бактерий, снабженных клонированными генами плодовых мушек — дрозофил. Самой трудной задачей для них оказались поиски необходимой химической реакции, связывающей между собой разрозненные протеины, и формирование материала, с которым можно работать различными способами. Созданная таким образом лента может выдерживать растягивание на 300%, прежде чем она разорвется, и притом выдерживает такое растяжение множество раз пока ее первоначальная форма не изменится.

Применение этого материала может послужить для восстановления кровеносных сосудов, сердечных клапанов, а особенно для замены межпозвонковых дисков. Эти диски служат для амортизации позвонков всякий раз, когда мы так или иначе сгибаем спину — намного чаще и во много раз больше, чем блоха прыгает на протяжении своей жизни²⁴, и которые, к сожалению, менее упругие, чем нано-рессоры этого насекомого!

*Пролин (пирролидин- α -карбоновая кислота) — гетероциклическая аминокислота (точнее, иминокислота). Существует в двух оптически изомерных формах — *L* и *D*, а также в виде рацемата. *L*-пролин — одна из двадцати протеиногенных аминокислот. — *Википедия: ru.wikipedia.org*

Стойкие участники сопротивления: Прочность

Лучшие зубы Земли...

Ничто не устоит пред ними — ни древесина, ни бетон, ни металл. Материал резцов крысы мог бы заменить клинки промышленной дробильной машины для получения гранул или крупы и целиком сделанной из пластика. Эти клинки тупятся за несколько часов работы, и дробление приходится часто прерывать ради необходимости их заточить. Из-за периодических простоев существенно снижается производительность дробильной машины.



Рис. 4.4. Резцы и дробилка. Слева: резцы крысы. В центре: стачивающее движение верхней и нижней челюсти постоянно заостряет резцы. Справа: самозатачивающаяся дробилка, вдохновленная этим методом. (© Marcus Rechberger, Fraunhofer Institute for Environmental, Safety & Energy Technology)

В отличие от резцов большинства млекопитающих, резцы крысы не полностью окружены эмалью. Она покрывает только их передние поверхности, тогда как внутренние (задние) поверхности голые — они состоят из более твердого дентина, стабилизирующего зуб. Резцы крысы растут всю жизнь, животное укорачивает их за счет применения: при этом происходит продолжительное трение поверхностей, покрытых эмалью, о поверхности из дентина. Мягкая составляющая стачивается, оставляя впереди частично срезанный край, который постоянно самозатачивается. Эмаль на этих краях резцов тверже некоторых металлов вроде свинца, меди или железа, из которого делали ловушки для этих грызунов.

Швейцарские исследователи²⁵ из Института экологических, безопасных и энергетических технологий Фраунхофер (*Fraunhofer*), позаимствовав это, были вознаграждены. Они с участием одного промышленного партнера разработали дробилку с самозатачивающимися клинками. Каждый из этих выпуклой формы клинков покрыт в задней части сплавом карбида вольфрама и кобальта, а спереди — множественными слоями особенно прочной керамики. По мере эксплуатации клинки затачиваются, становясь тоньше и тоньше. Со временем они выполняют свою функцию более эффективно, потребляя при этом все меньше энергии. Гордые своим заимствованием у лучших зубов Земли разработчики позиционируют этот материал под девизом: «Запустите его и забудьте о нем». Но вот вопрос: смогли бы сами разработчики забыть об этом, если бы им не удалось изобрести клинки, которые восстанавливаются сами по себе?

... И морские уши

Брюхоногий* моллюск *Haliotis rufescens*, более известный под именем красный моллюск (*ormeau*), или морское ухо, живет у берегов Калифорнии. Внутреннее пространство его раковины отделано перламутром, который укрепляет жилище гастропода и который производится на протяжении развития моллюска, а также для восстановления. Этот материал тверже керамики и очень востребован в сфере ювелирии, что, к сожалению, приводит к проблеме угасания вида. Моллюск морское ухо приобрел такую прочность в процессе эволюции, находясь под прессом постоянной агрессии своего главного хищного врага — выдры, которая с остервенением ломает его раковину, ударяя ее о камень прямо на своем животе[†].

Моллюск вырабатывает свой перламутр в виде своеобразной черепицы из карбоната кальция — а точнее из минерала арагонита. Пластинки перламутровой черепицы в тысячу раз тоньше челове-

* Брюхоногие, или гастроподы, или улитки (лат. *Gastropoda* от др.-греч. γαστρ «брюхо» и др.-греч. ποσ «нога»), — самый многочисленный класс в составе типа *Mollusca*, который включает около 100 000 видов, в России — 1620 видов. — ru.wikipedia.org

[†] Судя по всему, речь идет о калане — морской выдре, которая имеет манеру раздирать свою добычу на собственном животе, при этом держась на поверхности воды на спине. — *Прим. перев.*

ского волоса. Этот материал производится с участием морской воды, служащей субстратом, способствующим кристаллизации. В одном слое перламутра каждая черепица немного надвинута на соседние. В восходящих пластах середины пластинок черепицы расположены одна над другой, связанные посредством скрепляющего белка — конхиолина. Последний надежно скрепляет разные слои между собой, исключая черепицы одного и того же слоя, которые сохраняют возможность свободно скользить по отношению друг к другу, отводя существенную часть энергии, угрожающей целостности раковины. Именно эта особенность составляет рецепт огромной ударопрочности этого материала.

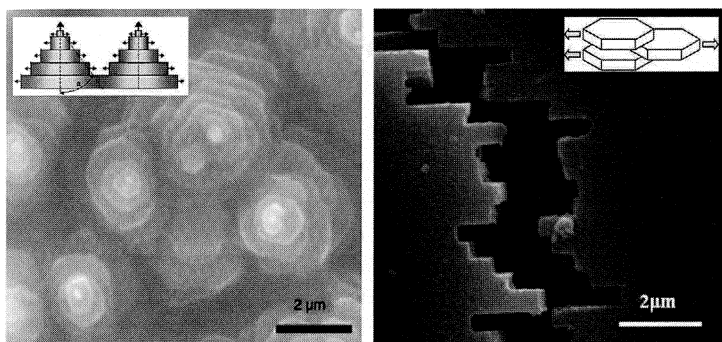


Рис. 4.5. Микроструктура перламутра красного моллюска. *Слева:* шести-гранные пластинки перламутровой черепицы из аргонита уложены штабелем одна над другой и связаны адгезивным белком конхиолином. *Справа:* под действием удара пластинки черепицы могут смещаться в стороны. (© Marc Meyers, Университет Калифорнии, Сан-Диего)

Попытки изготовления материалов, по строению подобных перламутру красного моллюска, были предприняты во многих лабораториях, в том числе лабораториях Калифорнийского университета в Сан-Диего²⁶. Здесь разработали металлический композит, состоящий из напластованных слоев алюминия — заменяющего аргонит,

и титана — заменяющего конхиолин (органическое вещество раковины моллюска). При испытаниях нового материала на прочность в пластину толщиной 2 см вбивали раскаленный докрасна вольфрамовый стержень со скоростью 900 метров в секунду. Стержень продавил образец лишь на доли сантиметра. . .

Весьма многообещающие сферы приложения подобных разработок очевидны. Например, военное обмундирование или поверхностные покрытия в области авиации — замена прежних очень токсичных материалов.

ЧАСТЬ II

Поведение

ГЛАВА 5

ОТ АВТОМАТОВ К АНИМАТАМ

Движение одной-единственной мошки таит в себе больше чудес, чем все человеческие творения; если кому-нибудь захотелось бы купить картину с изображением всех движущих сил и механизмов этого мелкого насекомого или научиться искусству создания автоматов и машин, которые двигаются подобно мошке, то для оплаты такой картины не хватило бы всех ценностей мира, всех людских доходов, золота и серебра.

Марин Марсенн

Философские игрушки

С первыми машинами, имитирующими поведение живых систем, связано много легенд. Реальность существования некоторых автоматов, память о которых сохранена в истории, на самом деле вызывает большие сомнения. Скажем, легенда поэта Виргилия о мухе из бронзы, которая служила для того, чтобы распутать всех мух, заполонивших Неаполь. Равным образом можно усомниться в существовании говорящей головы, которая отвечала «да» или «нет» на все задаваемые ей вопросы. Ее связывают с именем Герберта из Орильяка, который жил в Средние века и, став Папой, получил имя Сильвестр II*. То же самое полностью относится к информации, согласно которой немецкий математик и астроном Региомонтанус (*Regiomontanus*) изготовил металлическое крыло, полетевшее

*Герберт из Орильяка, папа Сильвестр II (*Gerben of Aurillac*) (ок. 945–1003) — средневековый ученый и церковный деятель, папа римский (999–1003). Три года (с 967 г.) провел в Северной Испании, где познакомился с арабской наукой, изучал квадривий. Позднее изучал логику в Реймсе; с 972 г. преподавал в кафедральной школе в Реймсе. — <http://www.termes.ru/dictionary/>

навстречу императору Максимилиану, когда тот входил в Нюрмберг (*Nuremberg*) в 1470 году. Наконец, вспомним очень красивую историю о гуманоиде, которого создал философ Рене Декарт, — гуманоид с лицом его покойной дочери Франсины. Переправляясь через море, во время путешествия в ответ на приглашение королевы Швеции Кристины, он поместил гуманоида в сундук. Капитан судна, неожиданно обнаружив этот жестикулирующий автомат, тотчас отдал распоряжение выбросить его за борт, узрев в нем творение Сатаны.

Автоматы, существование которых не вызывает сомнений, можно классифицировать по трем категориям: те, что испытывают технику своей эпохи; те, что созданы быть игрушками; и те, что служат для понимания анатомии и физиологии живого.

Представители первой категории появлялись благодаря экспериментированию с эффектами гидравлического давления пара или сжатого воздуха, как, например, голубь из дерева, сделанный Архитом* (IV век до н.э.), чье точное описание было нам явлено²⁷, или как мифические животные и персонажи, созданные Героном Александрийским[†], чьи творения мы относительно хорошо знаем.

* Архит (*Ἀρχιτάς*) (ок. 435 — после 360 до н. э.) — др.-греч. философ, пифагореец; родом из Тарента, друг Платона. Сохранились фрагменты его трудов «О математических науках» и «Беседы». Архит — редкий пример выдающегося математика и оригинального мыслителя, который добился успеха в управлении государством. Он плодотворно занимался всеми науками пифагорейского квадривиума (арифметика, геометрия, гармоника и астрономия), которые считал родственными, возможно, потому, что их объединяет теория пропорций. Арифметика Архита была тесно связана с гармоникой... Он продемонстрировал, что основные гармонические интервалы, напр., октава (2:1), кварта (4:3), квинта (3:2), а также целый тон (9:8), не могут быть разделены пополам. Эти и другие исследования Архита завершили пифагорейскую гармонику, развитую впоследствии Евклидом и Птолемеем. — *Новая философская энциклопедия: В 4 т. / Под редакцией В.С. Стёпина. М.: Мысль, 2001.*

† Герон Александрийский (др.-греч. *Ἡρόν Ἀλεξανδρεὺς*) — греческий математик и механик. Время жизни отнесено ко второй половине первого века н.э. Герона относят к величайшим инженерам за всю историю человечества. Он первым изобрел автоматические двери, автоматический театр кукол, автомат для продаж, скорострельный самозаряжающийся арбалет, паровую турбину, автоматические декорации, прибор для измерения протяженности дорог (древний одометр) и др. Первым начал создавать программируемые устройства (вал со штырьками с намотанной на него веревкой). — <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

Представители второй категории автоматов служат, скорее, для того, чтобы впечатлить или очаровать публику и сильных мира сего.

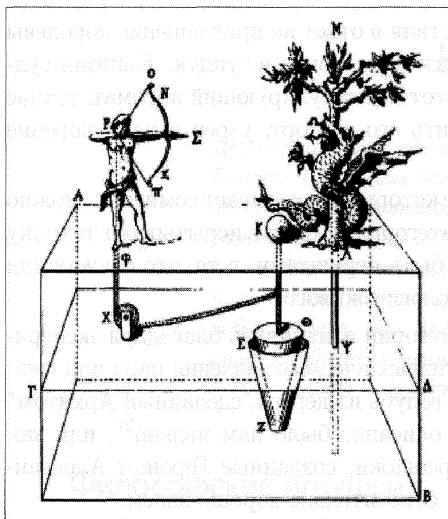


Рис. 5.1. Автоматы Герона Александрийского. На постаменте поставлено маленькое дерево, вокруг которого обвился дракон; рядом помещена фигура Геркулеса с луком в руках; наконец, прямо на постаменте лежит яблоко. Если кто-то захочет протянуть руку и взять это яблоко, Геркулес пускает свою стрелу в дракона и дракон шипит». (Герон Александрийский. «Пневматики»)

Это, несомненно, относится в первую очередь к различным анимированным автоматам из золота и серебра, украшающим «трон Соломона», установленный в зале приема иностранных послов. Его создал механик Леон Философ для Византийского императора Феофила, в IX веке. Это относится и к музыкантам, играющим на различных инструментах, придуманным Хансом Булманом (*Bullman*) из Нюрнберга в XVI столетии, а также к подвижной карете с лошадьми и кучером, которые Франсуа-Жозеф де Камю создал в XVII веке — для развлечения Людовика XIV, когда тот был ребенком. Наконец, это касается ложного автомата, но реально играющего в шахматы, демонстрацией которого Вольфганг фон Кемпелен (в XVIII веке), а затем Иоганн Непомук Мельцель* (уже в XIX веке) удивляли

*Иоганн Непомук Мельцель (нем. *Johann Nepomuk Mälzel*; 1772–1838) — немецкий механик, пианист, педагог.

Европу и Америку. относящиеся к третьей категории, которая близка сфере бионики. Но поскольку их изобретатели или конструкторы намеревались проверить гипотезы, сформулированные ими в отношении тех или иных механизмов живого, это порождало различные запреты — философские и религиозные. Так, в конце XV века Леонардо да Винчи позволил себе практиковать препарирование человеческих трупов, следуя давним греческим и мусульманским традициям, тогда как на Западе эта практика тогда не была официально разрешена. Благодаря практике препарирования Леонардо начиная с 1495 года задумал (но, видимо, не построил) автомат в облике германо-итальянского рыцаря, который мог садиться, вставать, двигать руками и головой, мог открывать и закрывать свою челюсть. Он, несомненно, вызвал бы у зрителей потрясения. Этот автомат имел две независимые механические системы: одна — для верхней части тела, другая — для нижней. Один механизм на основе блоков с зарубками находился в груди и мог координировать движения плеч, локтей, запястий и рук. Внешняя рукоятка позволяла задействовать ноги — двигать бедрами, голеньями и лодыжками с помощью кабелей, заменявших сухожилия. В Музее Человека в Сан-Диего можно увидеть реконструкцию этого автомата-андроида, созданную на основе плана Леонардо. В XVII веке механистические взгляды Рене Декарта на поведение животных привели затем Жюльена Офре де Ламетри* к переносу их на человеческое поведение. Все это способствовало стремлению воспроизводить живое посредством автоматов. Большие технические прорывы, особенно связанные с развитием искусства часового производства и миниатюризацией соответствующих механизмов, тоже помогали реализации подобных объектов. Самые знаменитые изобретатели автоматов среди часовщиков — Жак де Вокансон (*Jacques de Vaucanson*)[†] и Жак Дро (*Jacquet-Droz*) отец и сын (XVIII век).

* Жюльен Офре де Ламетри (*Julien Offray de La Mettrie*) — французский врач и философ-материалист (1709–1751). — По материалам *Интернета*.

[†] Жак де Вокансон (1709–1782) — французский механик и изобретатель. Десятый сын в бедной семье перчаточных дел мастера. Учился в школе иезуитов, затем монахов-минимов. — <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

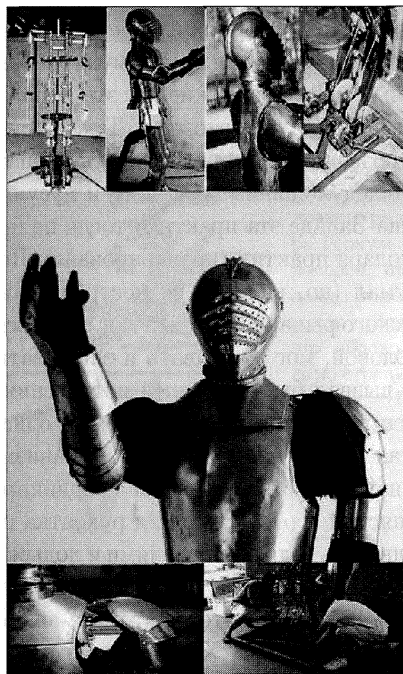


Рис. 5.2. Реконструкция андроида Леонардо да Винчи, экспонируется в Музее Человека в Сан-Диего. (© Сан-Диего, Музей Человека)

Два хирурга, Клод-Никола ле Ка (*Cat*) и Франсуа Кесней (*Quesnay*), подтолкнули Вокансона к смелой разработке «воспроизведения способностей в целях получить экспериментальное понимание одного биологического механизма». В 1738 году он представил Королевской академии наук записку с описанием трех автоматов, которые составили его славу: флейтиста, барабанщика (он, кроме того, играл на свирели) и утку. Из этих трех автоматов самым знаменитым стала именно утка. Ее описывали так: «искусно созданная утка может есть, пить, переваривать пищу и испражняться, чистить свои крылья и перышки, имитируя различные манеры живой утки». Цилиндры с металлическими зубчиками, похожие на те, что имеются в музыкальной шкатулке, приводили в действие рычаги, которые

посредством связующих нитей создавали движения утки. Благодаря одной серии зубчиков Вокансон сумел запрограммировать последовательности ее движений, которые очень реалистично передавали произвольное поведение птицы. Причем морфология была выполнена весьма тщательно: каждое крыло было снабжено более чем четырьмя сотнями подвижных частей. Что касается ее «физиологии», она описывается в язвительных спорах о механической и химической природе пищеварения, и по заявлениям самого Вокансона, утка переваривает пищу за счет химического «растворения» зерен, которые она клюет. Потом утка выбрасывает продукт этого растворения через искусственный анус.



Рис. 5.3. Утка-автомат. Слева: выдержка из записки, представленной Вокансоном Королевской академии наук в 1738 году. Справа: репродукция утки Вокансона, сделанная Фредериком Видони, мастером кинетических автоматов. (© Francis Lara, Музей автоматов в Гренобле)

Существование этого изобретения засвидетельствовано Жаном Эженом Робером Уденом (*Houdini*), скорее известным благодаря своим талантам иллюзиониста и механика, чем своими... неточными записями. Ремонтируя эту утку, перед тем как ее представлять на большой Всемирной выставке 1844 года в Пале Руаяль, он констатировал одну простую хитрость: она выделяет время от времени какое-то зеленоватое вещество, приготовленное заранее, совершенно

не связанное с тем, что утка поглощает. К моменту этого эпизода прошло уже 100 лет с тех пор, как утка была сконструирована, и как отмечают Альфред Шапюи (*Chapuis*) и Эдуар Жели (*Gélis*)²⁸: «известно сколько «автоматов Вокансона» было создано соревнующимися копиистами в ту же эпоху, и мы полагаем, что утка, описанная известным иллюзионистом, была одной из таких копий. Однако нам кажется, что описанная Робером Уденом подделка была не самой грубой — мало-мальски достойной таланта великого механика-изобретателя и относительно приближенной к имеющемуся описанию всех функций оригинала. Мы считаем также, что чрезмерное изобилие идей, высказываемых автором «Откровений иллюзиониста», приводят его к уверениям, точность которых проверить невозможно».

Следы утки и секретов ее изготовления потерялись в XIX веке. Современная ее версия, гораздо более обобщенная, чем оригинал, однако по-прежнему очень зрелищная, экспонируется в Музее автоматов в Гренобле.

Программируемые автоматы

Вокансон, создавший свои знаменитые автоматы, был избран в парижскую Королевскую академию наук благодаря поддержке Людовика XV. Затем он получил пост инспектора шелковых мануфактур. Здесь он применил свои цилиндры с зубчиками, которые позволяли программировать повторяющийся узор на материи во время ткачества. Пятьдесят лет спустя именно это нововведение открыло путь новым машинам по изготовлению жаккардовых* тканей (машин Жаккарда). Жаккард, в свою очередь, воспользовался подсчетами Чарльза Бэббиджа (*Babbage*), который по словам его ассистентки Ады Лавлейс (*Lovelace*) «ткет алгебраические узоры, как машины Жаккарда ткют цветы и прочий растительный орнамент». Эти машины были предвестниками компьютеров...

*Ткани, узор на которых, обычно довольно замысловатый, создается за счет переплетения нитей в процессе ткачества. — *Прим. перев.*

Другие мастера-часовщики XVIII века швейцарец Пьер Жак Дро* (*Jacquet-Droz*), его сын Генри-Луи и его приемный сын Жан-Фредерик Лешо† (*Leschot*), тоже оказались причастными к прогрессу в области программируемых автоматов. Три самых знаменитых из созданных ими автоматов: музыкантша, рисовальщик и писатель. Две из шести тысяч частей этих автоматов тоже перемещаются за счет зубчатой передачи, но еще более мудреной, чем у автоматов Вокансона²⁹. Полагают, что эти фигуры были созданы в сотрудничестве с местными хирургами и что их остовы, выполненные в натуральную величину, являются муляжами настоящего человеческого скелета. *Подвижная анатомия* этих андроидов позволяет одному на самом деле играть на органчике, другому по-настоящему рисовать, а третьему реально писать, выводя фигуры или буквы с помощью гусиного пера и чернил. Это заметно отличает их от более ранних автоматов, авторы которых довольствовались условной имитацией соответствующих действий. Дополняя реалистичность, все описываемые фигуры в процессе своего представления еще и дышат. И вот



Рис. 5.4. Три самых знаменитых автомата мастеров Жак Дро (*Jacquet-Droz*). (© Museum of Art and History, Neuchâtel (Switzerland); photography S. Iori). Слева направо: рисовальщик, музыкантша и писатель

*Пьер Жак Дро (1721–1790), механик по точным работам, часовой мастер и философ из Нейенбурга. — По материалам Интернета.

†Жан-Фредерик Лешо (*Jean-Frédéric Leschot*, 1746–1824) был удивительным часовщиком и гениальным экспертом в области механики.

одна тонкая деталь, восходящая к медицине той эпохи: музыкантша дышит именно так, как дышат женщины: грудью — сверху вниз!

Из-за недостатка столь одаренных изобретателей и механиков впоследствии изготовление биологически реалистичных автоматов вышло их употребления.

Прото-роботы

В конце XIX и начале XX века, когда психология как самостоятельная область знаний начала отделяться от философии, возник интерес к испытанию живых систем посредством систем искусственных. Работы физиологов-новаторов, таких как Иван Павлов или Жак Лёб (*Loeb*), и психологов вроде Эдварда Торндайка, Джона Уотсона и Буррхуса Скиннера*, поставили акцент на значимости восприятия, с одной стороны, и на связи между восприятием и действиями — с другой. Множество гипотез, подразумевавших обучение по схеме «стимул–реакция», конкурировали между собой. И некоторые исследователи переносили эту схему с живых созданий на машины. Этот демарш психолог Кларк Халл (*Hull*) назвал «робототехническим подходом», он предполагал использование таких машин в психологии в качестве «формы профилактики субъективного антропоморфизма». Вот в таком контексте появились первые роботы.

*Все трое перечисленных американских психологов, по сути, являются отцами-основателями так называемой психологии поведения — бихевиоризма. Для этого направления психологии характерно отрицание собственно психики как предмета науки. Бихевиористы полагают, что объективно можно изучать только поведение, а еще точнее — поведенческие реакции живого существа в ответ на разные стимулы. Схему «стимул–реакция» они взяли у И.П. Павлова и именно его сами почитают основателем «объективной психологии», не отличая ее от психофизиологии. Исходя из вышесказанного, нет ничего удивительного в том, что большинство «психологических» экспериментов психологи-бихевиористы проводили (и сейчас проводят) на животных, преимущественно — на крысах и собаках. К сожалению, это тупиковое направление психологии было практически господствующим на Западе, особенно в США, вплоть до конца 1980-х годов. — *Прим. перев.*

В противоположность автоматам, которые воспроизводят всегда одни и те же действия, согласно однажды проторенной дороге, роботы могут двигаться по-разному, в зависимости от контекста, в котором находятся. Действительно, они снабжены сенсорами* и так называемой *архитектурой управления*, осуществляющей связь между этими датчиками и исполнительными механизмами. Сенсоры эквивалентны чувствительным рецепторам, воспринимающим окружающие стимулы — внешние и внутренние³⁰. Архитектура управления (*architectures de contrôle*) эквивалентна нервной системе, проводящей эти стимулы и принимающей решения относительно последовательности необходимых реакций. Она приводит в действие *исполнительные механизмы*[†]. Эти последние играют роль эффекторов, аналогично роли мышц в живой системе.

В 1912 году инженеры Джон Хаммонд (*Hammond*) и Бенджамин Мьеснер (*Miessner*) сконструировали «*Electric Dog*» — электромеханическую собаку³¹, квалифицировав ее как «искусственную гелиотропную машину», с помощью которой можно будет проверять теорию тропизма физиолога Жака Лёба[‡]. Этот ящик снабжен спереди двумя датчиками и тремя колесами (два колеса — для движения вперед, и одно колесо ориентировано назад), перемещаясь за счет «фототропизма»: собака способна двигаться прямо на свет какого-нибудь карманного фонаря, даже если свет меняет направление. Ее механизм управления очень простой: колеса крутятся тем быстрее, чем больше стимулируются сенсоры; заднее колесо снабжено электромагнитом, он ориентирует это колесо на тот самый маневр, который ящику задает самый сильно стимулированный сенсор. Эффект оказался сенсационным: впервые машина двигалась без программы движений, точно заданной заранее. Один популярный журнал описал эту машину как «наделенную почти человеческим умом». А Лёб, будучи очень впечатлен электрической собакой, обобщил

*Здесь и далее в книге авторы используют термин «*capteur*» (буквально — «улавливатель»), или датчик, сенсор. — *Прим. перев.*

†Авторы употребляют здесь и далее термин «*les actionneurs*», обозначающий, по данным Интернета, «устройство управления движением автомата». — *Прим. перев.*

‡Лёб Жак (*Loeb, Jacques*) (1859–1924) — американский биолог немецкого происхождения. — *dic.academic.ru*

свою теорию тропизмов на вещи, непосредственно не связанные с двигательной функцией, такие как любопытство и удовольствие.



Рис. 5.5. «Электромеханическая собака» Хаммонда (*Hammond*) и Мьеснера (*Miessner*) привлекается светом фонарика. (© *Roberto Cordeshi, Università di Roma, La Sapienza*)

Вспоминая этот героический период, упомянем также инженера Бента Русселя (*Russell*) — 1913 год, психолога Джона Стефенса (*Stephens*) — 1929 год и электрохимика Томаса Росса (*Ross*) — 1935 год, которые стремились приумножить умения прото-роботов за счет архитектур управления, способных к обучению практическим действиям. Гипотезы о практическом обучении «методом проб и ошибок» были выдвинуты бихевиористами Торндайком и Уотсоном. Гипотезы можно было проверить благодаря этим машинам, если предположить, что электрическая трансмиссия будет представлять нервную проводимость и что уменьшение или нарастание сопротивления можно соотносить с воздействием «поощрений и наказаний», следующих за «хорошими» и «плохими» реакциями, соответственно.

Вскоре появилось множество прото-роботов такого типа, и они были так же быстро забыты, как предыдущие, по причине ограничений тех теоретических и технических знаний, на которых они основывались³². Благодаря этому укрепилась идея, что сложное поведение живых систем может быть воспроизведено только с помо-

щью таких же невероятно сложных механизмов. Прежнее мнение, будто машины следующего поколения могут внести здесь свой вклад, было опровергнуто. . .

Кибернетические роботы

Вторая мировая война подстегивала разработчиков машин — так называемых разумных машин. Была установлена параллель между механизмами, позволяющими живым системам и искусственным системам следовать по направлению к predetermined целям. И теперь придавали особое значение *внутреннему состоянию* машин. Это состояние уже больше не сводили к упрощенной схеме «стимул-реакция». Предвосхищая желаемое состояние, машина отныне должна была быть способной контролировать сама себя.

Такая идея составляет суть кибернетики — дисциплины, начавшей свое развитие в 1942 году благодаря математику Норберту Винеру (*Norbert Wiener*). Кибернетика объединяла знания из различных областей (информатика, психология, социология, физиология, антропология). Механизмы обратного действия — позитивного и негативного — рассматривали как основу автономии машин³³. В 1943 году этот механизм был использован в системе наведения баллистических ракет *Navy*, способной предвосхищать траекторию полета вражеских самолетов, чтобы лучше их сбивать. В том же году невролог Уоррен МакКалоч (*McCulloch*) и математик Уолтер Питтс (*Pitts*) опубликовали статью, утверждающую, что искусственные нейроны способны приводить в исполнение законы формальной логики. Эта работа ориентировала кибернетику на подходы, гораздо более связанные с биологией, чем это было прежде, подкрепляемая метафорическим подобием мозга человека и архитектуры управления машины.

Новых роботов конструировали с целью разработать принципы автономного контроля. Наиболее примечательными в этом ряду являются Гомеостат, или «ультрастабильная машина», психиатра Уильяма Росса Эшби (*Ross Ashby**) — 1948 год, кибернетические

*Уильям Росс Эшби (*William Ross Ashby*; 1903–1972) — выпускник Кембриджского университета, английский психиатр, специалист по кибернетике, пионер в исследовании сложных систем. — По материалам Интернета.

черепяхи нейрофизиолога Уильяма Грея Уолтера (*Grey Walter*) — 1949 год, и электронная лиса Альбера Дюкрока (*Ducrocq*) — 1950–1953 годы.

Гомеостат представлял собой аппарат с четырьмя гальванометрами на подвижных изолированных магнитах. Стрелка каждого гальванометра (предположительно) должна была оставаться между двумя пределами. И «выживание» Гомеостата зависело от того факта, сможет или не сможет он поддерживать каждую из этих стрелок в *зоне жизнеспособности*, которая ему задана. Внутренняя организация аппарата была такова, что, если экспериментатор сдвигал одну из стрелок и пытался изменить тем самым один из заданных пределов, все стрелки начинали двигаться, поскольку система противостояла внешней агрессии и реорганизовывала себя таким образом, чтобы вернуть обратно все стрелки в зоны стабильности. Эта реорганизация приводила в действие две цепи обратной связи: одну — для исправления нарушенного вначале баланса стрелки и вторую — для систематического поиска нового баланса для всех без исключения стрелок.

Кибернетика

(От др.-греч. *κυβερνήκη* (*kubernetike*) — искусство управления кораблем.)

В 1940-х годах математик из Массачусетского института технологии (MIT) — Норберт Винер и инженер Джулиан Бигелоу (*Bigelow*) основали дисциплину, которая изучает сходства и различия между целенаправленными биологическими процессами, управляемыми нервной системой, и процессами техническими, контролируемые механическими, электрическими и электронными средствами. Главный принцип функционирования покоится на понятии гомеостазиса (постоянства, стремления «остаться тем же»), которое объясняет, как система порождает поведение, способное уменьшить различие между ее актуальным состоянием и тем состоянием, которого она должна достичь, следуя к своей цели.

Идея пришла в голову двум исследователям при обсуждении способов поведения баллистических ракет, основанных на этих принципах. Такие системы казались «разумными», будучи способными предвосхищать траекторию своих мишеней, но они словно бы страдали от беспорядков в двигателе, ибо при попытках уменьшить трение воздуха по длине траектории их движения, они входили в серию неконтролируемых колебаний. Физиолог Артуро Розенблют* (*Rosenblueth*) тогда заметил, что подобную патологию можно наблюдать у пациентов, получивших повреждение мозжечка. Они на самом деле способны программировать общую траекторию движения стакана воды к их рту, но не могут ее выполнить точно, поскольку амплитуда их движений преувеличена настолько, что вода выплескивается из стакана не проделав до конца свою траекторию. Норберт Винер пришел к мысли прибегнуть к помощи петли обратной связи[†] взаимодействия с внешним миром, и второй петли обратной связи — взаимодействия с внутренней средой. Обратная связь призвана оценивать всякий момент оптимальный образ действий.

Этот генеральный принцип был распространен не только на поведение индивидов и машин, но также на общество и индустрию. В книге «Кибернетика и общество», опубликованной в 1950 году, Норберт Винер предупреждает о политической ответственности за результаты этой науки, предвидя замену рабочих разумными машинами и объявляя о конце демократии, если оставить без внимания необходимость подготовки к постиндустриальной эволюции, которая позволит человеку жить, будучи совершенно свободным от работы.

Хотя эта машина с точки зрения ее поведения не была настолько притягательной, как фототропическая собака Хаммонда (*Hammond*) и Мьеснера (*Miessner*), она открыла новые перспективы в понимании принципов адаптации живых систем. Способы, позволяющие жи-

* Розенблют Артуро (*Rosenblueth Arturo*) (1900–1970) — мексиканский нейрофизиолог и кардиолог. — По материалам Интернета.

† Это подразумевает обратное влияние на некое устройство выполненного им действия — влияния положительного или отрицательного. Нередко специалисты просто используют термин «обратная связь». — Прим. перев.

вотному выживать в очень сложных условиях окружающей среды, отныне могли интерпретироваться в терминах постоянного поиска компромисса (совместимости) между гомеостатическими показателями внешнего и внутреннего состояний.

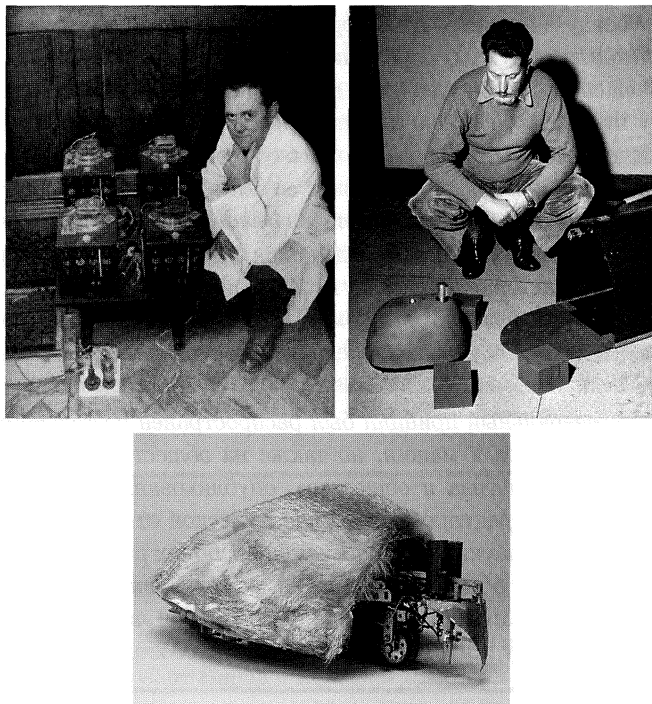


Рис. 5.6. Кибернетические роботы. *Вверху слева:* Росс Эшби (Ross Ashby) и Гомеостат — «ультрастабильная машина». *Справа:* Грей Уолтер (Grey Walter) и его кибернетическая черепаха Элси (ELSIE), которая собралась отправиться в свою «нору». (Иллюстрация любезно предоставлена Оуэном Голландом из Университета в Эссексе. (Взята из книги: *The Robot Book*, Richard Pawson, Windward, 1985, p. 14.) *Внизу:* электронная лиса Альбера Дюкроа (Ducrocq) сейчас хранится в Национальном музее искусств и материалов. (© Musée de Conservatoire National des Arts et Métieres.) (См. цветную вклейку)

Уильям Грей Уолтер* (*Grey Walter*) воспринял эту перспективу и приложил ее к мобильным роботам. Это позволило ему, помимо прочего, дружески подтрунивать над неподвижным ящиком Эшби (*Ross Ashby*), именуя его не иначе как «соней» — «*Machina sopora*» — (спящая машина). Два робота самого Грея Уолтера, покрытые панцирем, приобрели видовое название «*Machina speculatrix*» (рассуждающая машина) — машина, которая «ищет цель». Один из них был назван *ELMER* (*ELectro MEchanical Robot*[†]), а второй *ELSIE* (*Electro Light Sensit IvE with Inernal and External stability*[‡]), *ELMER* был прототипом *ELSIE*. Эти кибернетические черепахи имеют двойной исторический интерес. С одной стороны, это были первые роботы чье поведение человек уже не мог предсказать полностью, поскольку они как бы следовали своим собственным целям. С другой стороны, в них впервые были применены полые трубки, полупроводники и транзисторы — иначе говоря, первые составляющие электроники, — гораздо более быстрые, чем электромеханические компоненты.

Каждая из черепах была оснащена одним датчиком улавливающим свет, одним датчиком столкновения, двумя колесами сзади и одним колесом непосредственно спереди. Лежащий в основании контур служил для поддержания восприятия средней освещенности: если освещенность была слишком сильная, машина замедлялась, а если чересчур слабая, то машина начинала «искать» какой-нибудь источник света, обследуя пространство поблизости. Это действие сочеталось с внутренним состоянием машины: когда батареи машины были полностью заряжены, свет становился для нее гораздо более «антипатичным», но если они были пусты, свет становился притягательным. Благодаря этому черепахи естественным образом направлялись в свои «норы», когда пора было подзарядиться энергией (норы были сильно освещены). Эти качества позволяли обеим

*Грей Уолтер (*William Grey Walter*) (19.02.1910 — 06.05.1977) — известный английский физиолог, является пионером электроэнцефалографического исследования мозга, известен как один из создателей «живых автоматов». — По материалам Интернета.

[†]Электромеханический робот (англ.). — Прим. перев.

[‡]Электрический светочувствительный (робот) с внутренней и внешней стабильностью (англ.). — Прим. перев.

машинам длительно функционировать без специальной электрической подзарядки. Кроме того, поскольку они были снабжены светящимися маячками, закрепленными на их панцире, они воспринимали друг друга как притягательные объекты. Это порождало характерное поведение: стремление приблизиться друг к другу и постоять рядом — удачно названное Греем Уолтером «поведением ухаживания»: они были похожи на голубя с голубкой. Такие сложные поведенческие проявления тем более удивительны, что они мало соотносятся с простыми гомеостатическими принципами, лежащими в основе их функционирования.

Хотя прото-роботы были потом заброшены, поскольку механизмы, определяющие поведение живых систем, были расценены гораздо более сложными, эти черепахи доказали, что в основе сложного поведения могут лежать простые механизмы.

Грей Уолтер придумал других роботов, таких как *CORA* (*Conditionel Reflex Analogue*) *Mashina docilis* — машина, которая «легко обучается» методом проб и ошибок. Она была снабжена некой формой памяти и была способна усвоить связь между нейтральным стимулом и реакцией, как собака Павлова, — с помощью запрограммированных условных рефлексов. Однако эта машина не была подвижной, как две предыдущие. Она существует до сих пор и находится в лондонском Музее наук. А *ELSIE* была реконструирована исследователем Оуэном Голландом в Бристоле.

Джоб — электронная лиса, созданная немного позднее французским ученым Альбером Дюкроком³⁴ (*Ducrocq*), была представлена в Ньоре (*Niort*) в 1954 году в рамках одной выставки громко титулованной «Жизнь в 2000 году». В отличие от описанных предыдущих, этот робот был оснащен несколькими сенсорными модальностями: визуальной системой (два фотоэлемента), аудиосистемой (микрофон, соединенный с усилителем), тактильной системой (датчики столкновения), обонятельной системой («емкостное чутье» — «*flair capacitif*») и вестибулярной системой (датчики, размещенные на «шее лисы», обеспечивали чувство ориентации в пространстве). Как и *CORA*, этот робот из фанеры и электронных деталей, покрытый сверху лисьим мехом, был способен к элементарному обучению благодаря памяти на магнитной ленте. Кроме того, он мог коммуницировать

(общаться) посредством двух лампочек — красной и зеленой, — находящихся на верхушке его головы. Такие качества робота позволили изобретателю квалифицировать его как: «*хитрый* аппарат с пятью сенсорными каналами, способный получать суммарную модель своего окружения, постоянно учитываемую и подвергающуюся корректировке под действием опыта».

Почему в последующие годы такие роботы не появились во множестве и не были усовершенствованы? Несомненно, по причине налетевшего шквала под названием «искусственный разум» и необычайного интереса, в этом ключе, к человеческому мозгу...

Интеллектуальные системы

Начиная с 1936 года британский математик Алан Тьюринг (*Turing*) разрабатывал схему машины, способной обрабатывать информацию, и показал, что она теоретически может производить те же операции, что и человеческий мозг (или любое другое обрабатывающее информацию устройство).

Параллельно кибернетической парадигме начала делать свои первые шаги ее конкурентка — парадигма вычислительная. Эта парадигма при создании систем управления искусственными устройствами исходила не из принципов работы нервной системы живого организма, а из принципов вычислительной машины и предоставляла новую возможность ставить вопросы о работе человеческого мозга и интерпретировать их. В результате появился компьютер, а точнее — эквивалент тех современных портативных средств, которыми мы сейчас пользуемся.

Тогда считали, что вычислительные машины способны, как человек, обрабатывать заложенные в них коды в виде символов двоичной системы (0 и 1), с помощью двух видов памяти — *живой* памяти и *мертвой*, — которые были подобны человеческой кратковременной и долговременной памяти, соответственно.

А в 1956 году в ходе летней конференции Дартмут (*Dartmouth*) Колледжа в Нью-Гемпшире пионеры искусственного разума Марвин Мински (*Minsky*), Джон МакКарти (*McCarthy*) и Клод Шеннон

(Shannon) затеяли «создание информационных программ, которые будут выполнять задачи более удовлетворительным способом — как человеческие существа, когда они используют ментальные процессы высшего уровня, такие как понятийное понимание, организация памяти и критический анализ». В частности, эти исследователи имплицитно предполагали, что искусственные системы смогут обойтись без моторных и сенсорных функций, зато развить когнитивные способности до человеческого уровня. Довольно быстро исследователи получили подкрепление своих планов в их эффектном приложении. Такие программы, как *General Problem Solver (GPS)*³⁵, оказались способными разрешать множество проблем рассудочного характера: начиная от решения простых головоломок вроде головоломки «Ханойские башни»* (*Tours de Hanoi*)³⁶ и до демонстрации сложных математических теорем. А такие системы, как *Dendral* и *Mycin*³⁷, оказались авторитетными экспертами в распознавании химических молекул и в диагностике заболеваний крови. Помимо этого названные системы могли пояснить основания своих решений, то есть выполняли как раз то, что люди — специалисты в этих областях — подчас сделать не могут. Или вот еще программа *Eliza*³⁸. Она была основана на психотерапевтическом методе американского психолога Карла Роджерса и говорила с человеком-собеседником на естественном человеческом языке — это достижение утрачивает всякую мистичность в тот момент, как только понимаешь, что программа отвечает фразами, составленными из ключевых слов, использованных пациентом[†], и что она довольствуется повторением фразы, когда не может дать никакого ответа.

В 1972 году, на пике успехов систем, называемых интеллектуальными, американский философ Хуберт Дрейфус заявил в своей

*Ханойская башня является одной из популярных головоломок XIX века. Эту известную игру придумал французский математик Эдуард Люка, в 1883 году, ее продавали как забавную игрушку. — ru.jazz.openfun.org/wiki/

[†]Главным компонентом метода Карла Роджерса — центрированной на клиенте психотерапии — является эмпатия (глубокое эмоциональное сопереживание и сопричастность психотерапевта пациенту), а один из основных приемов эмпатического общения состоит в повторении ключевых слов личностного высказывания клиента. Видимо, кажущаяся простота этого приема породила идею написать такую компьютерную программу. — *Прим. перев.*

книге «Чего компьютеры делать не могут»³⁹ о серьезных ограничениях их безжизненных мозгов. Самое главное, что для того чтобы машина могла эффективно работать, программисты *a priori* должны вложить в искусственную систему огромное множество человеческих знаний. В частности, смысл символов, которыми манипулирует компьютер, задан программистом. А что касается организации «интеллектуального багажа» компьютера, то человек самым естественным образом забывает (пренебрегает) вкладывать в машину те сведения, которые ему кажутся совершенно очевидными. Например, сведения о том, что тяжелые объекты сами по себе не держатся в воздухе или что если президент Франции находится на Елисейских полях, то его нога должна находиться там же.

Безжизненная разумность

Элиза — кибертерапевт по методу Роджерса

Пациент: *Люди все одинаковы.*

Элиза: *В каком смысле?*

Пациент: *Они всегда готовы нам досаждать.*

Элиза: *Вы можете привести конкретный пример?*

Пациент: *Да... мой друг посоветовал мне прийти сюда.*

Элиза: *Ваш друг вам посоветовал прийти?*

Пациент: *Он сказал, что я всегда подавленный.*

Элиза: *Я глубоко огорчилась, узнав, что вы подавлены.*

Пациент: *Да, это так. Я чувствую себя очень скверно.*

Элиза: *И вы думали, что, придя сюда, вы снова ощутите себя счастливым?*

Пациент: *Верно то, что я нуждаюсь в помощи.*

Элиза: *И что для вас означает — получить помощь?*

Пациент: *Может быть, я смогу понять как продвинуться вперед в отношениях с моей матерью.*

Элиза: *Расскажите мне о вашей семье.*

Пациент: *Моя мать заботится обо мне.*

Элиза: *А кто еще заботится о вас?*

Пациент: Мой отец.

Элиза: Ваш отец?

Пациент: Вы в некоторых аспектах похожи на моего отца.

Элиза: Какое сходство вы находите?

Пациент: Вы не очень агрессивны и желаете мне дать понять об этом.

Элиза: Что вас заставило думать, будто я не очень агрессивна?

Рассказывают, что вице-президент общества BNN (которое позднее будет стоять у истоков развития Интернета), полагая, что он разговаривает по телетайпу с коллегой, на деле общался с программой Элиза. И тогда происходил следующий диалог.

Вице-президент: Я смогу попользоваться этим компьютером сегодня утром?

Элиза: Почему вы об этом спрашиваете?

Вице-президент: Это, вероятно, позволило бы мне сделать дополнительные дистанционные продажи.

Элиза: Почему вы в этом не уверены?

Вице-президент: Потому что мои будущие клиенты никогда не видели демонстрацию этой системы в действии.

Элиза: А это для вас, действительно, очень важно?

Вице-президент: Разумеется, это для меня важно!

Элиза: Похоже, вы очень убеждены в этой своей позиции.

Вице-президент: Да, это просто смешно!

Элиза: Что вы понимаете под: «Да, это просто смешно!»?

Вице-президент: Но разве есть хоть какая-нибудь весомая причина, не позволяющая мне использовать этот компьютер сейчас?

Элиза: Расскажите мне о ваших будущих клиентах...

Говорят, что весьма раздраженный этим разговором вице-президент позвонил своему коллеге и спросил: Почему вы были со мной столь высокомерны этим утром?

А коллега невозмутимо ему ответил: Что вы имеете в виду под: «Я был высокомерен с вами»?

Сус — программа, выносящая логические заключения

Вот некоторые из ее дедуктивных заключений, последовавших из тех сведений, которые в нее ежедневно закладывают люди.

- Матери всегда старше своих детей.
 - Чтобы есть, надо быть проснувшимся.
 - Можно видеть нос человека, но не его сердце.
 - Когда люди умирают, они остаются мертвыми.
 - Если разрезать кусок масла на две части, получаются два куска масла, но если разрезать на две части стол, то не получатся два стола.
 - Когда Фред держит свою бритву, она состоит из плоти (тела, кожи), металла и электрических компонентов, но это не машина.
 - Когда президент Линкольн был в Вашингтоне, его левая нога тоже была там.
 - Его имя и дата его рождения не менялись в течение его жизни.
-

Однако это и есть те самые имплицитные знания, которые критически важны для решения конкретных проблем каждого дня или для понимания содержания текста либо беседы. У живого организма полученные сведения, перегруппировываясь в соответствии со своим *общим смыслом*, не поступают сразу в его распоряжение, но должны быть переработаны с учетом опыта, который организм получает не только от мозга, но и от тела, снабженного сенсорными и моторными органами.

Этот общий смысл невозможно раскрыть, прибегнув к помощи формальной безжизненной системы. Начиная с 1984 года два молодых исследователя из Массачусетского института технологии (MIT) — Дуг Ленат (*Doug Lenat*) и Раманатхан Гуха (*Ramanathan Guha*) — решили принять вызов. Их информационная программа *Сус* должна была уметь говорить с людьми на естественном языке, освоив все тонкости языка. *Сус* призван был выводить общий смысл на основе знакомства со всеми категориями, полученными при взаимодействии

со множеством людей всех возрастов, разного пола, комплекции, социального и материального положения или же посредством анализа содержимого разных энциклопедий. И хотя он смог уловить смысл очень неоднозначной английской фразы: «*Can a can canscan?*»⁴⁰, оказалось, что количество информации, необходимой для хорошего понимания смысла разговора возрастает по экспоненте и что «человеческий разум» *Сус* идет на понижение. По этой причине амбиции программы немного поубавились и переориентировались на извлечение данных из Интернета — впрочем, для такой задачи программа оказалась вполне компетентной.

В начале 1990-х годов большинство программ, прежде квалифицированных как «интеллектуальные», подлежало реконвертации. Искусственный разум «форте» отныне стали именовать «старый добрый искусственный разум». По-английски это наименование выражается аббревиатурой *GOF AI* — *Good Old Fashioned Artificial Intelligence*.

Программы этого типа все еще очень распространены в наши дни. Они нацелены на «разумную» переработку данных всех сортов, но больше не претендуют на использование тех же механизмов, что и человеческий ум. Так, программы *Deep Blue* и *Deep Fritz* вступали в официальное соревнование с двумя чемпионами мира по шахматам — с Гарри Каспаровым и Владимиром Крамником. И хотя эти программы способны просчитывать миллион операций в секунду и запоминать все ходы тысяч шахматных партий, их способы рассуждения ни в чем не приближались к мышлению этих шахматных чемпионов.

Все по той же причине — отсутствие понимания общего смысла — работы, сконструированные в героическую эпоху *GOF AI*, были мало способны действовать в реальном мире. Их создатели кодировали их посредством символов, но эта обширная информация не усваивалась машинами настолько, чтобы свободно решать конкретные базовые задачи.

Адаптивные роботы: аниматы

Причину относительной стагнации разумных систем можно резюмировать так: то, что трудно выполнять человеку, с легкостью осуществляет компьютер, и наоборот! Такого рода системы без труда доказывают теорему Тале (*Thalès*) и просчитывают тысячи шахматных ходов, но не способны определить обычный объект не утонув при этом в ненужных деталях. Иначе говоря, формально рассуждать о реальном мире нередко гораздо проще, чем взаимодействовать с ним.

В 1986 году, в разгар эпохи искусственного разума, Родней Брукс (*Rodney Brooks*) — молодой докторант лаборатории Джона МакКарти (*McCarthy*), не побоявшись доминирующей идеологии, решил придумать робот не столько разумный, сколько адаптивный, то есть способный выходить из затруднений, возникающих в реальном мире. Для этого он с самого начала стремился воспроизвести в нем те способности, которые люди унаследовали от животных, а не специфически человеческие. Мы, как и животные, умеем перемещаться, ориентироваться в окружающем пространстве, действовать в направлении своих жизненно важных потребностей, прилагая при этом все возможные способы базовой активности, без которой мы были бы не способны развить даже малую толику своего разума. Брукс интегрировал в концепцию своих роботов способность, к действиям (главное упущение искусственного разума «форте») — способность, свойственную в равной степени насекомому и человеку. Он не стал снабжать его символами с заранее предопределенным смыслом, но оснастил сенсорами, исследующими сырые (необработанные) данные окружения. Он не стал программировать комплексные процессы рассуждения (анализа), а только заложил простые модули поведения, которые активизировались параллельно под действием тесного взаимодействия с окружением.

Благодаря таким простым принципам этот шестиногий робот по имени Дженгис (*Genghis*) был способен перемещаться, обходя внешние препятствия, притом не имея ни малейшего представления о понятии «препятствие», и мог без труда проходить через дверь,

не имея ни малейшего представления о понятии «дверь, или проход». Эти качества были абсолютно немыслимы для предыдущих интеллектуальных устройств.

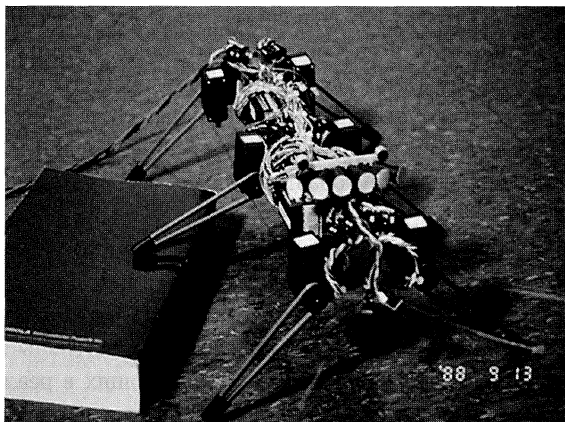


Рис. 5.7. Робот по имени Дженгис (*Genghis*) — первый анимат. (© Rodney Brooks, MIT, Лаборатория компьютерной науки и искусственного интеллекта)

Исследовательское сообщество оценило этот подход, назвав впоследствии такие устройства аниматами. Термин «анимат» содержит в себе части выражения «*animal artificiel*»⁴¹ («искусственное животное»). Аниматы являются автономными, адаптивными и ситуационными. Они *автономны* потому, что имеют потребности и побуждения, достаточные для существования без помощи человека или с минимальной помощью. Они *адаптивны*, поскольку могут обучаться и развиваться, что улучшает шансы на сохранение и выполнение своих функций в более или менее сложном окружении, а также при непредвиденных или угрожающих обстоятельствах. Они ситуационны, поскольку их способности к адаптации основаны на сенсорно-двигательных цепях, индуцированных и поддерживаемых при постоянном взаимодействии устройства с окружающей средой.

Разработка аниматов помогла обогатить биологические знания о живых системах. Вернувшись снова, этот подход нацелился на

сопоставление или модификацию этих знаний применительно к совершенно новым гипотезам. Спустя полвека этот подход соединил в себе дух изобретателей прото-роботов и кибернетических роботов, но уже с опорой на современные информационные и электронные технологии вместо устаревших электромеханических цепей.

Изобилие источников для заимствования

С момента появления жизни на нашей планете прошло примерно 3,5 миллиона лет, и очевидно, что условия выживания примерно одинаковы для всех живых существ. Исключением являются некоторые микроорганизмы, например экстремофилы⁴² (*extrêmophiles*), которые могут выдерживать температуры от -15°C до $+110^{\circ}\text{C}$, радиацию в 1500 раз более высокую, чем может выносить человек, давление воды более 1000 атм (атмосфер), находясь в океане на глубине 11 000 м. Однако большинство других организмов нашли множество способов, позволяющих им занять определенную экологическую нишу с более усредненными физическими условиями — примерно такими же, какие требуются нам, людям. Организмы, сильно отличающиеся друг от друга по анатомии, органам движения и чувств, по принципам управления этими органами, из поколения в поколение захватывали новые среды обитания, тоже весьма различные.

Эти организмы смогли обеспечить свое выживание, поэтому их качества незамедлительно были заимствованы инженерами для разработки адаптивных аниматов.

ГЛАВА 6

ВОПЛОЩЕННОЕ ДЕЙСТВИЕ

Природа побуждает к действию, человек — делает.

Иммануил Кант

Изобретение колеса часто служит аргументом в пользу того, что Природа не смогла найти этот очень эффективный метод передвижения для живых организмов. Однако два замечания убеждают, что этот метод, несомненно, не был самым удобным. С одной стороны, в ту эпоху, когда животные начали осваивать сушу⁴³, дороги еще не построили. Прошло добрых 5500 лет прежде чем шумеры изобрели колесо, как средство передвижения.

Большинство способов перемещения в жидкой среде или по неровной земле — топкой, грязной, устланной ветками и булыжниками — это: плавание, ползание и ходьба.

Плавание

По типу тунца

Тщательное изучение различных способов плавания рыб позволило классифицировать всевозможные типы движения.

При *угревидном** плавании, как плавают угорь или мурена, все тело вовлечено в волнообразное движение. При *тунцевидном* и

*Энгвильформное (с изменением формы) передвижение, вызываемое регулярными поперечными деформациями, метасинхронически проходящими вдоль туловища. — *IFTToMM Dictionary, Chapte 11 (Russian – French)*

карангиформном* передвижении видах плавания, как плавают тунец и форель, задняя часть тела колеблется и играет свою роль в продвижении вперед, а грудные плавники служат для управления. Это противоположно другому виду плавания — острагиформным способом†, как плавают рыба-чемодан, которую мы упоминали в одной из предыдущих глав, — противоположно, поскольку здесь тело остается неподвижным, не изгибается. Рыба движется вперед за счет колебательных движений грудных плавников, а рулем служит хвостовой плавник. Три первых вида передвижения энергетически затратны, но обеспечивают большую скорость и маневренность. Четвертый способ плавания требует меньших энергетических затрат, но он медленнее. Морфология животных тоже причастна к эффективности способов передвижения.

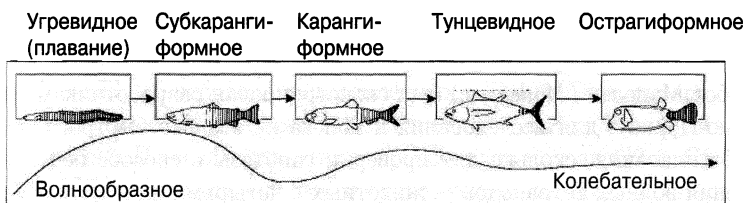


Рис. 6.1. Различные виды плавания, классифицированные согласно пропорциям тела, которое при этом волнообразно извивается или колеблется

При создании многих плавающих роботов были применены описанные типы движения. Тунцевидный способ оказался наиболее предпочтительным, поскольку позволяет придать движущемуся под водой объекту скорость и притом возможность быстро маневрировать, что зачастую бывает необходимо. Например, красный тунец развивает скорость до 75 км/час и может брать виражи в 90°.

На основе этой модели в Национальном институте морских исследований в Токио были разработаны всевозможные микро- и макро-

*Карангиформное передвижение (*Carangiforme*) — волнообразное передвижение рыбы, вызываемое поперечной деформацией хвоста и концевых плавников (например, передвижение лосося или форели). — там же.

†Острагиформное (*ostraciforme*) — передвижение рыбы, вызываемое поперечными колебаниями только концевых плавников. — там же.

роботы, длиной от 50 мм до 3 м. Самый быстрый прототип *UPF-2001* может развивать скорость 0,97 м/сек. Что касается корейского *Po-Tuna* или американского *RoboTuna*, сконструированных в Массачусетском технологическом институте (*MIT*), или машины *VCUVV* (*Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle*) лаборатории *Draper* (достигающей скорости 1,2 м/сек, с поворотом на 75 °/сек), то все эти разработки еще далеки от совершенства своей природной модели, но позволяют понять принципы плавания. Турбулентные потоки, возникающие в кильватере рыбы — важное средство экономии энергии. Этой же цели служит геометрия тела рыбы, гибкость хвоста, повторные быстрые биения хвостовых плавников. Грудные плавники компенсируют риск килевой качки и, кроме того, важны для поддержания баланса всего тела.

Плывать, как плезиозавры

Робот *Маделен* (*Madeleine*) был сконструирован разработчиками из Нью-Йорка⁴⁴ для исследования и поиска не столько быстрого способа плавания, сколько для проверки гипотезы о способе передвижения водных тетраподов — животных с четырьмя плавательными конечностями. Некоторые из них уже исчезли с лица Земли, например плезиозавры⁴⁵, другие ныне здравствуют, например пингвины, морские черепахи и тюлени. *Маделен* демонстрирует, что простое использование четырех конечностей одновременно, производит необходимое ускорение, но с точки зрения энергетических затрат это обходится очень дорого. Вот одна из причин, почему плезиозавры, известные как самые грозные хищники прошлого, исчезли. Используя все четыре плавника в момент броска на свою жертву, они не имели благоприятных возможностей компенсировать свои энергетические потери.

Благодаря *Маделен* выяснилось, что средняя скорость при движении с помощью одних передних плавников достаточно высока и такой способ гораздо экономичнее, чем использование сразу четырех плавников, к тому же он позволяет тетраподам эффективно обходить препятствия. Полагают, что затем именно эта форма продвижения вперед была сохранена в арсенале эволюции, ибо именно

ее используют все ныне живущие морские тетраподы — у них задние конечности служат только для рулевого управления.

Аквариумные рыбы

Инженерные разработки все увереннее подражают поведению рыб, и даже наметилась тенденция заменять живых обитателей аквариумов их моделями. Некоторые из таких разработок уже воплощены.

Японская фирма *Mitsubishi Heavy Industries* сконструировала роботизированного целаканта*, длиной 120 см и способного плавать со скоростью 0,3 узла. Его можно взять напрокат за скромную сумму 1 200 000 йен в месяц, что соответствует примерно 7 400 евро. Возможно, это предотвратит браконьерскую ловлю этой редкой рыбы, которую даже считали вымершей несколько миллионов лет назад, но оказалось, что отдельные экземпляры латимерии еще сохранились в Индонезии.

Из всех рыб-роботов, представленных в Лондонском аквариуме, три созданы исследователями из отдела информатики Университета в Эссексе⁴⁶. По сведениям этих разработчиков модели *G9-1*, *G9-2* и *G9-3* могут достигать «скорости тунца, ускорения щуки и легкости угря». Например, тело созданного ими карпа имеет 50 см в длину, и модель плавает автономно (без дистанционного управления) в течение 5 часов и способна передвигаться со скоростью 30 см в секунду. Такой карп наделен сенсорами, позволяющими ему избегать столкновений со стеклянными стенками и другими рыбами. Разработчики хотят еще усовершенствовать автономию этих роботов, чтобы те могли сами плыть на подзарядку в электрические доки, подобно живым рыбам в поисках корма. Эти рыбы-роботы могли бы еще общаться между собой — разумеется, безмолвно, как живые карпы.

Их поведение настолько реалистично, что посетители Аквариума обычно принимают роботов за живых рыб, пока какая-нибудь деталь их облика не заронит сомнение в этом. Исследователи приглашают детей из окрестных школ посетить Аквариум, чтобы приобщить их

*Целакант, или латимерия (лат. *Latimeria*), — род современных кистепёрых рыб, единственный в составе семейства латимериевых (*Latimeriidae*) отряда целакантообразных. — По материалам Интернета.

к техническому творчеству и привить вкус к научным исследованиям — пример практики, почти совсем забытой и в нашей стране и в Объединенном Королевстве.

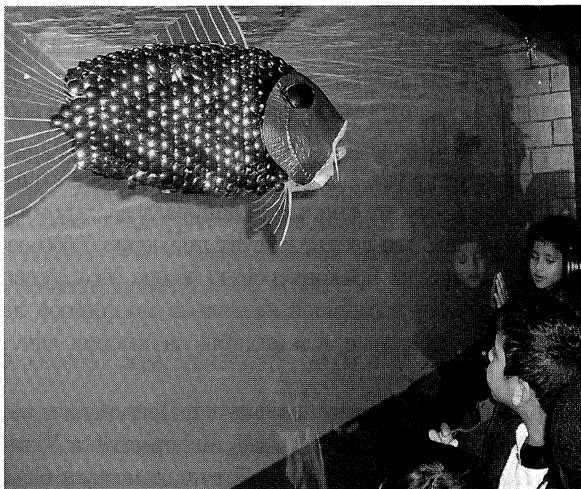


Рис. 6.2. Одна из рыб-роботов лондонского аквариума. (© Dr Jindong Liu, University of Essex.) (См. цветную вклейку)

Ползание

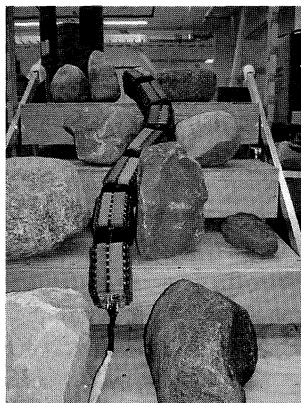
Боком, методом аккордеона и линейное

Волнообразные угревидные движения, применяемые для ползания по земле, имеют общие основные моменты: все позвоночные сегменты, из которых состоит тело, должны быть прекрасно скоординированы, чтобы слиться в едином эффективном продвижении. Исследователи в области робототехники стараются понять, как обеспечивается эта координация.

Разнообразные роботы-змеи Университета Карнеги Меллон пытаются воспроизвести основные способы ползания. *Латеральный*

(боковой) способ подходит для продвижения вперед по плоской поверхности. Метод *аккордеона* — для того чтобы карабкаться. А *линейный* — для перемещения по неровному грунту. Разные роботы выполняют, кроме того, всевозможные иные функции за счет различных программируемых циклических движений. Так, помимо классического ползания по разным почвам, они могут плавать, карабкаться по стене, взбираться по колонне, поворачиваясь вокруг нее, или пробираться в узкие трубы. Исследователи собираются уменьшить размеры этих устройств, тогда, скользя внутри сосудов или органических тканей, они могли бы искать повреждения или их можно было бы использовать для неинвазивных* хирургических вмешательств.

Рис. 6.3. Омнитрид — робот-змея для любых поверхностей. (© Johan Borenstein, University of Michigan)



Робот, разработанный в Университете Мичигана, по имени Омнитрид (*Omnitread*) служит для фундаментальных исследований ползания и поисков оптимизации движений этим способом. У Омнитрида, задуманного в виде позвоночного столба из своеобразных позвонков, нет запрограммированных способов передвижения, как было у предыдущих роботов. Особый двигатель, расположенный в одном

*То есть относительно бескровных, без грубого повреждения тканей. — Прим. перев.

центральной сегменте, оказался эффективнее множества моторчиков, размещенных в каждом из модулей позвоночника. Кроме того, оказалось, что при таком единственном взаимодействии с окружением можно автоматически адаптировать ползание к любым типам поверхностей.

Ходьба

По сравнению с ползанием, передвижение с помощью конечностей происходит быстрее и лучше приспособлено для преодоления препятствий. Это демонстрирует множество разных роботов: октоподов (восьминогих), гексаподов (шестиногих), четвероногих и двуногих — в процессе исследований в недрах различных лабораторий.

... Шестиногие

Походка гексапода более стабильна. Насекомое палочник* может приспособиться к разным неровностям на земле, даже неожиданно утрачивая некоторые из своих лапок. Один профессор⁴⁷ биологического факультета Университета в Билефельде (*Bielefeld*, Германия), изучив принципы локомоторного[†] контроля этого животного, сконструировал робота, который доказывает, что не существует центрального управления периодическими движениями ходьбы такого рода. Наоборот, каждая ножка автономна и только очень локально взаимодействует с соседними ножками. Даже если одну из ножек ампутировать, локальное взаимодействие реорганизуется заново между ближайшими оставшимися конечностями. Цикличность движений (мах вперед, постановка на почву, продвижение вперед, мах вперед...) проявляется как отражение взаимодействия нервно-мышечной системы с почвой.

Кроме того, в лаборатории Университета *Case Western*, США, было показано, что скорость ходьбы можно усилить, снабдив роботов,

*В оригинале — *le phasme*. Видимо, имеются в виду палочники: латинское название этой группы насекомых — *Phasmatodea*. — Прим. перев.

[†]То есть «двигательного», связанного со способом передвижения. — Прим. перев.

подобно тараканам, ножками, имеющими разные возможности в неприужденных движениях (это называется *степени свободы*) — пять для передних ног, четыре для средних ног и три — для задних.

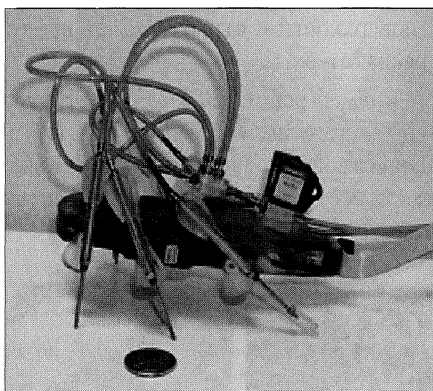


Рис. 6.4. *Sprawlita* — одно из наиболее быстрых искусственных созданий с походкой, заимствованной у таракана. (© Mark R. Cutkosky, Центр дизайнерских исследований Стенфордского университета)

В лаборатории *PolyPEDAL (Performance Energetics and Dynamics of Animal Locomotion)* в Беркли исследователи тоже применили локомоторные принципы тараканов и создали серию роботов *Sprawls* — самых быстрых из гексаподов. И, тем не менее, они передвигаются в 10 раз медленнее своего прототипа — живого таракана, который за секунду преодолевает расстояние, равное пяти длинам своего тела!

... Четвероногие

Среди четвероногих роботов вспомним одного по имени *Stickybot*, разработанного Марком Кутковским (Mark R. Cutkosky) и Кимом Сангбае (Sangbae) из Стенфордского университета в соавторстве с исследователями, упоминавшимися выше, где речь шла о ящерице гекконе. На всех пальцах у этого робота имелись микроворсинки, что позволяло ему карабкаться по стеклу или по совершенно

гладкой стене (благодаря действию ван-дер-ваальсовых сил, обеспечивающих замечательную сухую адгезию, подходящую для любых поверхностей). Оригинальность этого покрытия заключается в том, что нано-неровности имеют сплюснутую и ориентированную форму, почти как лопаточки на микроворсинках геккона. Это позволяет им прилепляться к поверхности и отрываться от нее гораздо быстрее, чем в прежних разработках.

Приведем еще пример робота *BigDog*. Эту Большую Собаку бостонские инженеры задумали для армии США и без тени сомнения преподносят ее как «самого продвинутого в мире квадропода». Робот может развивать скорость 5 км/час на ровной почве, подниматься по наклонам и транспортировать груз в 50 кг.



Рис. 6.5. Робот геккон и его нановорсинки. *Слева:* *Stickybot* — четвероногий робот-геккон, умеющий карабкаться по стеклу, и наблюдающие за ним разработчики. *Справа:* наноструктура искусственных микроворсинок со сплюснутыми концами. (© Mark R. Cutkosky, Центр дизайнерских исследований Стенфордского университета.) (См. цветную вклейку)

... Двунogie

Одна из главных трудностей робототехники — заставить двуногих роботов ходить подобно человеку. Для этого необходимо как-то

приспособиться к фазам неравновесия в цикле походки и корректировать положение тела за счет проприоцептивных* сенсоров, а также предусмотреть оценку окружения робота за счет визуальных и тактильных датчиков.



Рис. 6.6. Ашимо — двуногий робот-гуманоид умеет бегать и подниматься по лестницам. (© *Honda Motor Europe Ltd*)

В этой области не удавалось особенно продвинуться, пока одна франко-американская команда исследователей не предложила в 2002 году математический метод, позволяющий выбрать стратегию управления, наиболее подходящую морфологии робота. Результатом этой работы стал робот лаборатории автоматике в Гренобле по имени Кролик (*Rabbit*), снабженный туловищем с двумя ногами без ступней. Другие достижения в области ходячих роботов появились чуть позже. Например, американский *RunBot* перемещается на 3,5 длины своих ступней за одну секунду, а японский Ашимо (*ASIMO — Advanced Step in Innovative MO bility*)⁴⁸ развивает скорость 5 км/час, поднимается по лестницам и даже может изобразить несколько танцевальных па. А последняя его версия может еще и бегать.

Полет

Полет представляет еще большую технологическую сложность для искусственной системы, поскольку эта система должна постоянно преодолевать земное притяжение.

*То есть сенсоров, воспринимающих положение тела. — *Прим. перев.*

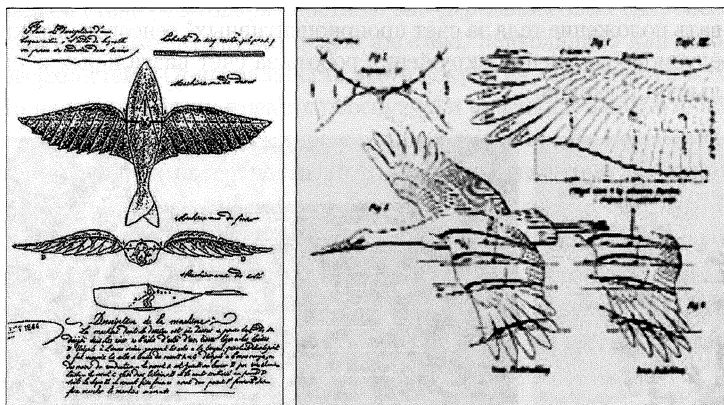


Рис. 6.7. Слева: «альбатрос» Жана-Мари Ле Бри. Справа: модель аиста Отто Лилиенталья

Многие аэропланы XIX века по форме напоминали птиц и млекопитающих, как, например, альбатрос навигатора Жана-Мари Бри (*Bris*), аист братьев Лилиенталь или летучая мышь Клемент Адера (*Ader*). Хотя большинство этих самолетов-имитаторов в течение очень долгого времени не были биомиметическими* и имели фиксированные крылья. Модели с машущими крыльями, известные в наши дни, вызывают бурное оживление в Интернете, особенно дроны. Эти летающие без пилотов машины, действительно, демонстрируют разные преимущества. Они могут лететь на малой скорости, делать резкие повороты и зависать на месте.

Различные техники полета насекомых и птиц тоже являются объектом пристального внимания. Благодаря своим бьющим крыльям насекомые перемещаются наполовину за счет толчка крыльев вверх и наполовину за счет толчка вниз. А птицы перемещаются только за счет толчка крыльев вниз, за исключением колибри, размер которых близок к размерам большого насекомого. Эта птичка

*Биомиметика (фр. *biomimétique*) — раздел биомеханики, направленный на развитие технических систем путем использования информации и функциональных принципов биологических систем. — *IFTtoMM Dictionary, Chapter 11 (Russian-French)*

применяет промежуточную технику: $3/4$ толчковых движений вверх и $1/4$ — вниз.

Колибри

Это та самая птичка, которая стала прототипом Ментора — орнитоопера с четырьмя дистанционно управляемыми крылышками, разработанного в Торонтском университете⁴⁹. Правда, размер этого аппарата гораздо больше колибри, он составляет 30 см, при массе 500 г. Тем не менее это первое искусственное устройство в котором воплощена возможность стационарного полета на протяжении 10 минут — благодаря повторению биений крылышек колибри. Однако очень большое потребление энергии существенно лимитирует продолжительность такого полета.

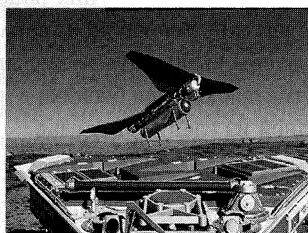
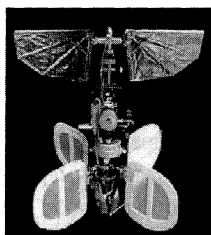


Рис. 6.8. *Вверху:* искусственный колибри по имени Ментор. (© James DeLaurier, University of Toronto.) *Внизу слева:* Роберт Михельсон тестирует устройство Энтомоптер (*Entomopter*), которое может махать крылышками, как ночная бабочка. (© Robert Michelson, Georgia Institute of Technology.) *Внизу справа:* кадр из анимационного видео, повествующего о применении Энтомоптера в марсианской атмосфере. (© NASA Institute for Advanced Concepts.) (См. цветную вклейку)

Насекомые

Энтомоптер (*Entomopter*) разработан в Научно-исследовательском институте Джорджия Тех⁵⁰, он работает на жидком топливе, обеспечивающем движения его крыльев наподобие ночной бабочки, с частотой 10 Гц. Эта разработка требует еще дополнительных сложных расчетов для улучшения аэродинамики и стабильности полета — в зависимости от таких параметров, как масса, структура крыльев и химия его искусственных мускулов (поскольку природа материалов, из которых состоит летающий механизм, на самом деле не менее важна, чем его морфология). Предполагают, что этот аппарат, шириной порядка метра, скоро будет летать над марсианской поверхностью. Действительно, слабое давление окружающей эту планету атмосферы обязывает, чтобы самолеты с фиксированными крыльями летали с постоянной скоростью 400 км/ч, а также усложняет их взлет и приземление. Только легкое летательное устройство с бьющими крыльями могло бы разом летать, и делать снимки, и приземляться, чтобы брать пробы.

Многие проекты вдохновлены летающими насекомыми, имитируя полет мух, пчел, стрекоз, например *MAV (Micro Air Vehicles)*. Такого рода проекты сейчас вызывают большой интерес в разных уголках мира, многие из них нацелены на военное применение. Самый маленький летающий аппарат длиной всего 25 мм оснащен камерой, чтобы выполнять разведывательную миссию.

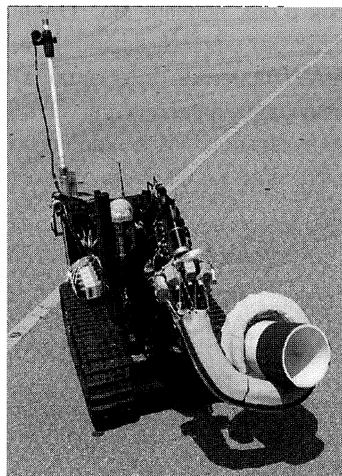
Другие приложения бионики в летательных аппаратах будут описаны в одной из следующих глав.

Захват

Для выполнения устройствами некоторых задач нередко требуется умение захватить или взять какие-то предметы. Во множестве искусственных подвижных аппаратов применены аналоги человеческой руки, но есть и другие формы захватывателей, менее сложные. К ним относятся и роботы проекта *OCTOR (SOft roboti Cmanipula*

TORs), задуманные исследователями из Южной Каролины. Эти роботы захватывают с помощью устройств наподобие щупальцев осьминога или слоновьего хобота.

Рис. 6.9. *OSTarm* — робот-слон. (© Ian D. Walker, Clemson University)



Робот *OSTarm*, например, снабжен рукой, которая действует за счет сжатого воздуха и может захватить любой незнакомый предмет благодаря сенсорам давления и положения. Его рука более умелая и сноровистая, чем руки коммерческих роботов, но действует она не так ловко, как животные-прототипы. На самом деле, слон может аккуратно взять маленький земляной орех и с таким же успехом ухватить ствол дерева, а осьминог может очень деликатно прощупывать закоулок в скале и отвинтить или вынуть пробку.

Перфорация

Поиски жизни на удаленных планетах подразумевают использование бурения, поскольку сильное ультрафиолетовое излучение не дает возможности живым организмам выживать на поверхности. Учитывая такую перспективу, английские инженеры разработали

перфорирующее искусственное устройство, вдохновленное яйцекладом осы, который служит ей для протыкания коры дерева чтобы отложить туда яйца. Описываемое устройство снабжено своеобразной иглой, которая состоит из двух частей, функционирующих бок о бок поочередно. Одна иглолка имеет зубцы, перфорирующие субстрат под давлением — так, чтобы избежать уплотнений, а другая имеет приемки (вместилища) для подъема на поверхность соответствующих фрагментов. Это биоподобное устройство весит меньше килограмма, потребляет всего 3 Вт электроэнергии и может добираться до глубины от одного до двух метров.

ГЛАВА 7

ПРОДВИНУТЫЕ СЕНСОРЫ

Ни один фокусник не сравнится с природой: она действует прямо у нас на глазах, при свете дня, и все же мы не можем окончательно постичь ее трюки.

Реми де Гурмон
(*Rémy de Gourmont*)

Зрение

Детекторы движения у мухи

Для того чтобы летающие роботы, вроде тех, что мы рассматривали в предыдущей главе, могли эффективно осуществлять навигацию⁵¹, надо их снабдить способностью оценивать расстояние, отделяющее их от земли, или определять возможные препятствия. Ради выполнения летающими аппаратами этих задач не всегда подходят уже изобретенные инженерами приспособления, например радары или телеметрический лазер.

Вот почему одна группа марсельских исследователей⁵² разработала навигационное устройство совершенно другой природы. Оно заимствует способ использования мухой своих нейронов — детекторов движения. Эти нейроны расположены в омматидиях* — в отдельных

*Фасеточные глаза — сложные глаза, основной парный орган зрения насекомых, ракообразных и некоторых других беспозвоночных; образованы особыми структурными единицами — *омматидиями*, роговичная линза которых имеет вид выпуклого шестигранника — фасетки. — <http://ru.wikipedia.org/wiki>

ячейках, из которых состоят сложно устроенные фасеточные глаза мухи. Они оценивают скорость прохождения по сетчатке⁵³ объектов, находящихся вокруг, — скорость относительную, которую еще называют *оптическим потоком* (*flux optique*).

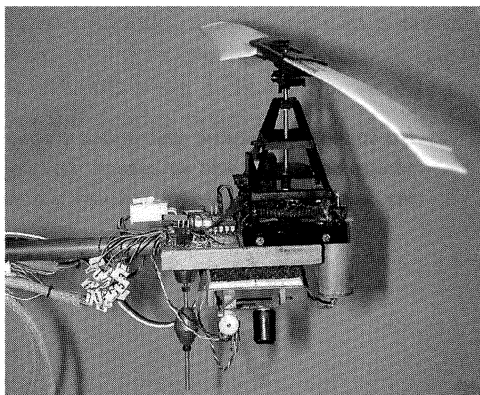


Рис. 7.1. Воспринимающий летающий робот, в котором использованы механизмы опознавания объектов, заимствованные у мухи.
(© Фототека CNRS, Nicolas Franceschini UMR6152 — Движение и восприятие, Марсель)

Эти нейроны имеют специфическую восприимчивость именно к прохождению объектов по сетчатке и могут улавливать движения в 10 раз быстрее, чем человеческий глаз⁵⁴. Итак, полагают, что амплитуда оптического потока есть функция расстояния до соответствующих объектов. Например, чем насекомое выше летит, тем медленнее ему видится перемещение земли. Исследователи предположили, что именно за счет восприятия оптического потока муха уточняет свои маневры при приземлении — поток останавливается, когда муха садится. Эту гипотезу подтверждает одно наблюдение в поведении насекомых, речь идет о снижении высоты полета при встречном ветре. Поскольку ветер снижает скорость полета, то движение объектов на земле воспринимается как очень медленное.

А при попутном ветре муха поднимается выше, так как он придает ускорение и кажется, что земля внизу движется очень быстро.

Принцип регуляции на основе оптического потока был испытан этими исследователями на множестве роботов. Среди них — летающий воспринимающий робот, снабженный шестом, который связан с центральной стойкой. Такое устройство позволяет ему летать по кругу, подниматься и садиться. Робот *Octave (Optic flow Control sys Tem for Aerospace VEhicles)* имеет защищенный патентом опто-электронный сенсор, который заимствует принцип работы нейронов детекторов движения. Этот постоянно направленный на землю сенсор преобразует значения оптического потока с помощью контроллера и постоянно соизмеряет скорость аппарата с его высотой. Такой же принцип можно было бы применить для определения боковых препятствий и их избегания. Подобный робот сможет воспроизводить характерные особенности полета насекомого: взлет, крейсерский полет и приземление, — и все это без тяжеловесной дорогостоящей и энергоемкой экипировки, вроде высотомеров, радаров, сонаров или систем *GPS*. Производители вертолетов и дронов всех мастей уже ведут по этому поводу переговоры с разработчиками...

Пустынные муравьи и викинги

Лесные муравьи, возвращаясь в родное гнездо, обмениваются своими запахами. Перемещаясь в поисках пищи, они оставляют на почве феромоны — своеобразные запаховые нити Ариадны, — служащие для возвращения к месту их экспедиции.

Муравьи *Cataglifis* не могут использовать этот способ навигации, поскольку живут в Сахаре. Палящие лучи солнца и ветры, которые продувают почву пустыни, поднимая клубы песка, способствуют быстрому испарению и устранению всех следов этой химической субстанции. Однако эти муравьи, очевидно, имеют эффективную систему навигации. Ведь при общих поисках пищи они исследуют местность зигзагами, но затем возвращаются в свое гнездо практически по совершенно прямой линии. Их рекорд — 592 м зигзагообразных поисков и всего 140 м обратного пути. Британские и французские этологи показали, что муравьи осуществляют навигацию

по счислению пути, как это делали викинги в Средние века, и что муравьи разом оценивают и длину своей дороги, начиная от точки отправления, и последующее направление следования.

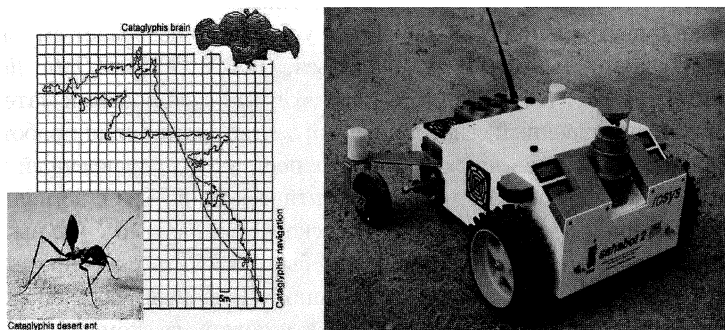


Рис. 7.2. Ориентироваться, как пустынные муравьи. Слева: муравей *Cataglyphis*, его зигзагообразный путь следования и траектория его возвращения (почти прямая линия). В верхнем углу этой схемы: мозг муравья *Cataglyphis*, объемом 1 см^3 . (© Rüdiger Wehner, Zürich University.) Справа: робот Сахабот 2 (*Sahabot 2*) ориентируется тем же способом, что и пустынные муравьи. (© Ralf Moeller, Bielefeld University)

При оценке расстояния муравьи, подобно мухам, используют оптический поток, а также информацию от проприоцептивных рецепторов — информацию о движениях, которые они сами осуществляют. В навигации же муравьям помогает солнечный компас — зрительные клетки, определяющие, в каком направлении поляризуется свет. Эта информация позволяет им установить свое местоположение по отношению к солнцу даже в пасмурную погоду⁵⁵. Такой механизм ориентирования очень прост, не требует ни сложных подсчетов, ни запоминания, поэтому достаточно иметь мозг объемом 1 см^3 , как у муравьев *Cataglyphis*.

Разработчики роботов из университета в Цюрихе скопировали способ навигации муравьев и применили его в мобильном роботе вместо обычных навигационных инструментов, вроде *GPS* — там, где они

не могут работать или ошибаются. Исследователи испытали робота Сахабот 1 (*Sahabot 1*) в тех же самых условиях, где живут пустынные муравьи. Этот робот для своей ориентации использует только солнечный компас, основанный на феномене поляризации света (т. е. сенсоры, чувствительные к поляризованному свету). А другой робот, Сахабот 2 (*Sahabot 2*), помимо этого, оснащен механизмом отслеживания дороги, постоянно информирует о пройденном пути. Сопоставляя результаты, достигнутые этими двумя роботами, инженеры пришли к выводу, что одновременное применение двух типов информации от навигационных сенсоров сравнимо с успешной навигацией пустынных муравьев.

Слух

Ноги, чтобы... слушать

Органы зрения повсеместно служат для оценки перемещения или местоположения, но для этого требуется открытое поле обзора. Когда у кузнечиков формируются пары, они не могут полагаться на зрение, чтобы найти друг друга, ведь их окружает высокая трава. И эти животные прибегают к фонотаксису (*phonotaxie*), то есть руководствуются звуковыми сигналами. У кузнечиков именно самки присоединяются к самцам. А самцы для привлечения самок издают стрекотание за счет трения надкрыльев одно о другое. Возникающий при этом звук отличается характерными для определенного вида частотой и ритмом. В репертуаре кузнечиков имеется три песни: одна песня для вызова соперника на бой, другая — для обхаживания самки и третья — для размножения. Самки с точностью узнают песню самцов за счет вибрации барабанной перепонки, которая находится в бедренных фалангах их передних ног. Звук следует по этим мембранам через респираторный аппарат — трахеи, связанные с боковыми стигмами*, имеющимися в каждом сегменте тела кузнечика. Такой механизм усиливает амплитуду вибраций с той стороны, откуда следует звук, — за счет более интенсивной стимуляции барабанной перепонки на этом боку. К тому же нейронные цепи заставляют ноги

* Другое русское название этих стигм у насекомых — дыхальца. — Прим. перев.

кузнечика, находящиеся именно на противоположной звуку стороне, ориентировать животное к источнику звука.

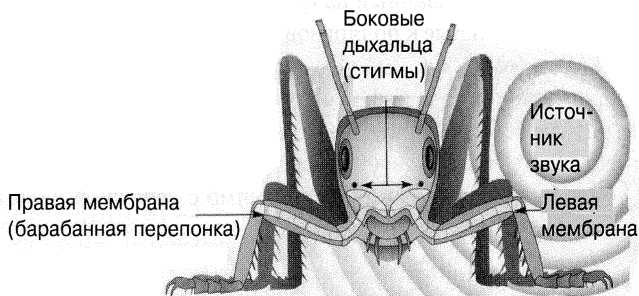


Рис. 7.3. Слуховое устройство самки кузнечика. Если доносящийся звук сильнее с одной стороны, то ноги кузнечика с этой стороны двигаются так, чтобы сориентировать его к звуку тем же боком

Группа нейрофизиологов и робототехников из Университета Эдинбурга сплотилась для того, чтобы применить знание сенсомоторной системы этих насекомых на практике. Робот-гексапод (шестиногий) представлял самку кузнечика, идущую на зов самца. А ящик (с походкой совсем не биомиметической*) перемещался в пространстве 70 м^2 , имитируя песню самца кузнечика. Эксперимент проводился за пределами помещения, и посторонние шумы примешивались к звуковому сигналу. Робот был оснащен впереди двумя миниатюрными микрофонами, разнесенными на 1,8 см и находящимися в 10 см от земли. Звуковые волны следовали по электронным цепям, подобно тому, как это происходит у кузнечика. Архитектура управления воспроизводила описанные сенсомоторные цепи кузнечика и координировала воспринимаемые сигналы с движениями ног и с направлением движения робота к источнику звука.

Мало-помалу, учитывая трудности, которые испытывал робот, модель его электронных цепей была модифицирована ближе к механизмам живой модели — гораздо более простым. Первая модель

*По поводу этого термина см. примечание выше.

робота подсказала биологам, что существует единый механизм, определяющий соответствие воспринятой песни нужной частоте и запускающий реакцию приближения к источнику звука. Вторая модель показала, что для упрощения вышеупомянутого механизма распознавания песни и определения «слов» песни важна роль периферической слуховой системы. А третья модель, воспроизводившая наблюдаемые задержки в активации вовлеченных нейронов, доказала, что определенные нейроны, которые считали важными в распознавании песни, на самом деле не играют никакой роли.

Подводные уши

Выше мы уже упоминали, как сигналы коммуникации между дельфинами вдохновили ученых на аналогичную передачу подводных сообщений. Робот Родольф (*Rodolph — RObotic DOLPHin*), разработанный в Йельском университете, на сей раз заимствовал способ эхолокации с помощью ультразвуковых кликов, используемых этими животными для определения препятствий и идентификации объектов. У этого робота имелись три передатчика, которые излучали и принимали звуковые волны одновременно, подобно автофокусу фотоаппарата. Центральный передатчик был размещен на конце своеобразной руки и испускал клики в направлении к объекту, а два других находились на своеобразных поворачивающихся ушах, улавливающих возвратное эхо. Эффективность описанного способа распознавания основывается на том, что уши ориентируются так, чтобы максимально усиливать эхо — как у летучих мышей. Это помогает заставить робота вертеться вокруг объекта на постоянном расстоянии — так же делают дельфины — для того, чтобы получить всю информацию, необходимую для идентификации данного объекта. И робот может запоминать типы эха, соответствующие каждому виду встречающихся объектов, что позволяет ему потом узнавать те объекты, которые он уже сканировал. Благодаря этому обследование нового окружения с помощью такого сонара значительно упрощается и удешевляется по сравнению с использованием камеры.

Обоняние

Тактика омара

Омар идентифицирует свою добычу по запаху. Днем он прячется среди рифов и в расщелинах, защищаясь там от сильных турбулентностей прибрежных регионов и от своих главных врагов: рыбы губана, трески, осьминога, краба и человека. Только ночью он выходит на поиски добычи — мелких ракообразных и рыбок, — нередко в абсолютной темноте. Чтобы различать своих жертв, он выработал любопытное поведение: периодически двигая головой сверху вниз, он улавливает несколько молекул выделений, оставленных его потенциальной добычей, находящейся на дальнем расстоянии от него. Его обонятельная чувствительность значительна. Утверждают, что он может почувствовать 33 мг аминокислот, добавленных в воду на другом конце олимпийского бассейна, в который перед этим была разведена сотня тонн соли, ради имитации состава морской воды! В естественных условиях задача омара тем более усложняется, поскольку подводные завихрения не позволяют ему следовать за потоком молекул. Он должен постоянно перемещаться в струе запаха, чтобы не потерять след своих жертв. Омар способен на такие подвиги благодаря *хемо-тропотаксии** Ориентация тела по направлению к источнику раздражения осуществляется путем активного перемещения — так называется процесс улавливания запахов в воде на расстоянии. Иначе говоря, он выполняет сравнение между химической концентрацией веществ в разных местах с помощью обонятельных органов[†], находящихся на его антеннах и конечностях. Выполняя головой резкие движения вверх, он захватывает молекулы волосками

*Тропотаксисом называют ориентацию тела за счет активного перемещения по направлению к источнику раздражения. — *Прим. ред.*

[†]Применительно к обонянию в воде эти органы чаще называют хеморецепцией или хемочувствительностью, поскольку этот процесс немного отличен от улавливания веществ, растворенных в воздухе, т.е. собственно обоняния на суше. Хеморецепцию считают эволюционным предшественником обоняния (не зря вещества, которые мы улавливаем в воздухе, должны попасть на *влажную* слизистую носа). — *Прим. перев.*

на своих антеннах. Затем он сравнивает концентрацию этих молекул с той концентрацией, что улавливают его ноги. Поднятый им ток воды всегда бывает более концентрированным. Медленно опуская голову, омар избавляется от молекул, захваченных перед этим, и может снова предпринимать маневр головой вверх.

Ученые из Бруклинского университета⁵⁶ разработали робот *BIC-SAAR* (*Biologically Inspired Chemical Sensing Aquatic Autonomous Robots*), его размеры примерно такие же, как у омара. Хотя робот не копирует в точности морфологию своего природного прототипа, он экипирован двумя антеннами, на которых находятся сенсоры, улавливающие молекулы (правда, это были не молекулы аминокислот, а молекулы флуоросцеина — согласно требованиям эксперимента). Сенсоры робота обладают таким же пространственным и временным разрешением, как обонятельные органы омара. Одна большая средняя антенна «подметает» грунт, имитируя сенсорную функцию ножек омара. В первое время робот, осуществляя движения головой, описанные выше, не мог уловить запаховый источник. Исследователи вновь вернулись к отслеживанию стратегии живого омара и пришли к выводу, что надо сделать робот второго типа и добавить сенсоры, позволяющие предъявлять поведение *реотаксии* (*rhéotaxie*) — локомоторное движение, провоцируемое подъемом потока, — такое как у омара. Однако остаточная неловкость сохранилась, и это заставляет думать, что омар еще не раскрыл всех секретов своей охоты.

Осязание

Вибриссы

У грызунов и кошачьих антенны заменены вибриссами — «усами», которые на самом деле являются очень чувствительным сенсорным органом. Подобно необычным чешуйкам акул, вибриссы крыс представляют собой их ценное достояние. Эти грызуны используют вибриссы для поиска и определения пищи; различения неровностей текстур; ознакомления с объектами; оценки скорости ветра и скорости

своего собственного перемещения; восприятия звуковых волн. А еще для того, чтобы, плавая, держаться над водой; ухаживать за партнером; ориентироваться в незнакомом пространстве; оценить размер отверстия, прежде чем в него пройти; или ширину небольшого рва, прежде чем его пересекать. С каждой стороны морды находится около трех десятков вибрисс. Каждая вибрисса снабжена тремя рецепторами разной тактильной чувствительности. Кроме того, вибрисса может двигаться, благодаря мышце, позволяющей ей принимать разные положения. Причем вибрисса может двигаться и самостоятельно, и вместе с другими вибриссами — синхронно или асинхронно. Вибрации больших вибрисс помогают распознать низкие звуковые тона и шероховатость поверхностей, а вибрации маленьких вибрисс определяют высокие тона и более гладкие поверхности. Частоты вибрации могут быть разными при выполнении разных типов задач — значительные частоты при общем обследовании и слабые — при более детальном знакомстве с объектом.

Робототехники очень заинтересованы в создании робота с вибриссами. Особенно для того, чтобы отказаться от визуальных сенсоров, производящих комплексную переработку информации, которые и могут время от времени быть источником перцептивных ошибок. Например, объект бывает неправильно распознан, потому что освещенность места изменилась. К тому же вибриссы могут управлять роботом в полной темноте, не конкурируя со звуковыми волнами, которые рискуют стать заглушенными или трудными для различения в некоторых ситуациях.

В рамках проекта *Whiskerbot* британские исследователи использовали электронные схемы, воспроизводящие сенсорную обработку данных, поступающих от вибрисс, когда те касаются различных текстур. Обнаружилось также, что вибрации необходимы для хорошего опознавания и что синхронные и асинхронные вибрации, возможно, соответствуют разным функциям, например, идентификации объекта или обследованию.

Аналогично, одна группа швейцарских исследователей, участвовавших в проекте *AMouse (Artificial Mouse)*, уточнила влияние числа вибрисс и частоты осязаний на множестве текстур, которые приходится распознавать. Другая группа в том же проекте имплан-

тировала роботу одновременно и вибриссы, и сенсоры освещенности, чтобы он мог следовать за источником света в загроможденном пространстве. Визуальные сенсоры осуществляют общее направление следования, тогда как вибриссы позволяют роботу проходить вдоль стен и избегать препятствия.

Мультимодальное восприятие

Робот-крыса *Psikharpa*

В течение нескольких лет наша собственная группа — АниматЛаб (*AnimatLab*), объединившаяся в 2007 году в Институте интеллектуальных систем и робототехники, в Париже 6 — работала над реализацией робота-крысы *Psikharpa* в рамках европейского проекта⁵⁷. Этот робот на колесах объединяет в себе большое множество сенсоров и систем управления, заимствованных у крысы, помогая решать фундаментальные проблемы, например лучше понять работу нервной системы позвоночных, а также прикладные проблемы — достичь значительной автономии роботов будущего.

По примеру электронной лисы Альбера Дюкрока, сенсорная экипировка головы этого робота очень разнообразна. В частности, там есть два зрительных сенсора для периферического и центрального зрения, обрабатываемых электронным чипом по аналогии с обработкой визуальных сигналов у млекопитающих. Эти сенсоры размещены в глазах и движутся благодаря двум моторчикам. Две искусственные улитки уха защищены ушными лопастями, которые могут поворачиваться. Центральная инерционная система заменяет вестибулярный аппарат, информирующий об угловых и линейных ускорениях головы. Наконец, вибриссы из углеродного волокна — по 33 с каждой стороны морды служат одновременно для определения текстур и распознавания объектов.

Работа по интеграции этих различных сенсорных модальностей позволяет понять, как мозг координирует и синтезирует соответствующую информацию, чтобы выработать согласованное представление об окружающей действительности. В частности, важно уточнить,

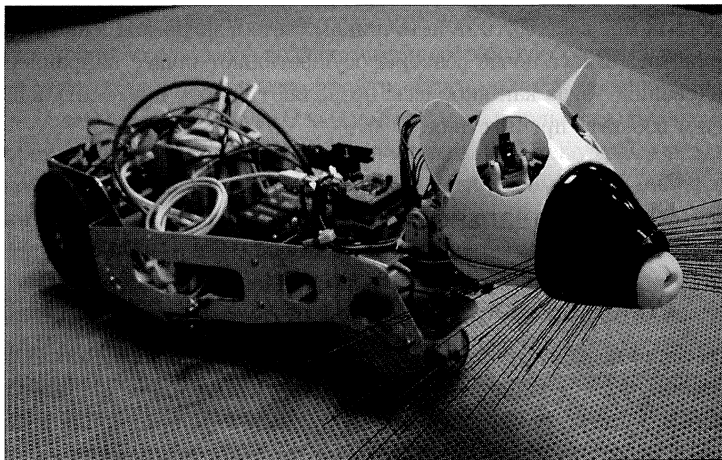


Рис. 7.4. Вид робота *Psikharpa* с заимствованиями у крысы в 2007 году.
(© *Christophe Grand, Steve Nguyen et Patrick Pirim, LIP6, ISIR et BVS*)

каким образом две сенсорные модальности действуют согласованно друг с другом, когда, например, вдыхание запаха хлебного багета укрепляет гипотезу, что этот лежащий перед вашими глазами хлеб — очень свежий. Или когда информация от одной модальности заставляет прилагать другую, поскольку она может оценить ситуацию точнее. Этот последний феномен используется в «эффекте трево-вещения», ведь мозг больше внимания уделяет зрению, а не слуху, и непроизвольно локализует источник слышимого звука с видом человека, губы которого шевелятся.

ГЛАВА 8

«КАНАЛИЗИРОВАННЫЕ» АРХИТЕКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Я видел там одного очень талантливого архитектора, который нашел интересный способ строительства домов, он начинал с кровли и заканчивал фундаментом. Такой метод он мне легко объяснил, указав на пример двух мудрых насекомых — пчелы и паука.

Джонатан Свифт

В предыдущих главах мы описывали только определенные аспекты поведения искусственных созданий, но они не всегда ясно определяют суть, поскольку запускаются в дело *архитектурой управления* (*architecture de contrôle*), переводящей сенсорные данные в действия. Действия изменяют внутреннюю или внешнюю среду робота либо животного, и эта среда передает сенсорам новую сенсорную информацию, которая, в свою очередь, должна быть переработана.

Архитектуру управления называют «канализированной» («*câblées*»^{*}), если вся организация этого эквивалента нервной системы, особенно ее внутренние параметры, соединена воедино и закреплена (заморожена) ее разработчиком.

В этой главе будет показано, что такой тип архитектуры управления может, так или иначе, обеспечить поведение — разнообразное и адаптированное к окружающим условиям. И эти архитектуры

^{*}Здесь — кавычки авторов. Это сравнение («*câblées*») можно перевести еще как «кабельные», «связанные» или «скрученные» системы управления. — *Прим. перев.*

могут способствовать возникновению способов поведения, которые изначально не были специально запрограммированы.

Зато архитектуры «не канализированные» (*non câblées*) могут модифицироваться по ходу опыта под действием адаптивных процессов, таких как развитие, обучение или эволюционирование. Тому будет несколько примеров в следующих главах.

Искусственный таракан

Тезис, который в 1990 году выдвинул Рэнделл Бир (*Beer*) из американского университета Кейс Вестерн Резерв (*Case Western Reserve*), важен с исторической точки зрения. С одной стороны, потому, что он сопутствовал началу аниматов как подхода, а с другой — поскольку он закладывал одно из первых практических приложений — нейроподобные сети управлением искусственных созданий. Этот новый подход был разработан в тесном сотрудничестве с биологами, специализирующимися на изучении американского таракана *Periplaneta americana*.

Нейронные, или нейроподобные, сети

Сразу уточним, что нейронные сети представляются в форме путей информационного кода, а не в форме искусственных клеток, связанных одна с другой. Это лишь аналогия — еще далекая — между операциями, осуществляемыми нервной системой и этими сетями, которые носят ее имя.

Концептуально эти информационные программы приводят в действие единицы, общающиеся между собой и называемые «формальные нейроны» или просто «нейроны». Каждый из этих нейронов обрабатывает данные, получаемые им от внешних или внутренних сенсоров, либо от других нейронов, с которыми он связан, и в результате этой обработки применяет функцию активации (f). Он берет также значение активации (x), которое в большей или меньшей степени уравновешено, и преобразует его в сигнал, входящий

в следующий нейрон, или в исходящий сигнал, если этот последний нейрон связан уже с исполнительным механизмом (*actionneur*). Соответствующее уравнивание (*pondération correspondante*) называют синаптическим весом (w), и оно соответствует возбуждающему или тормозному сигналу, передаваемому от одного нейрона к другому через синапс, — сигналу, который заставляет следующий нейрон быть готовым к действию или «расслабиться».

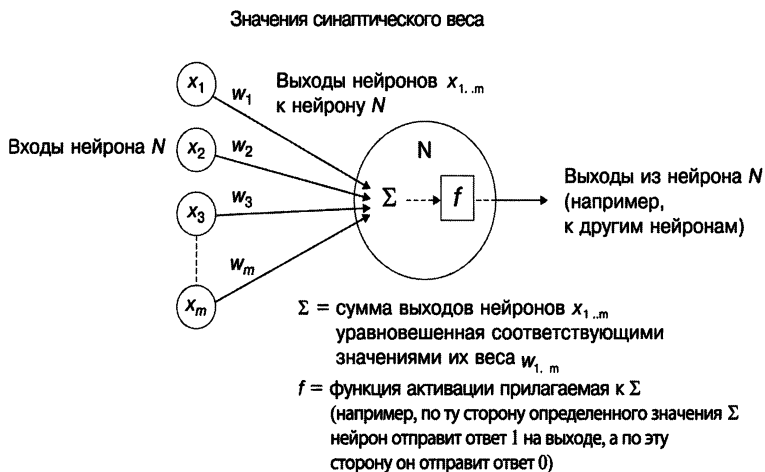


Рис. 8.1. В этом примере нейрон N создает сумму (Σ) значений активации входящих нейронов x_1, x_2 и т. д., уравнивленную значениями их «синаптического веса» w_1, w_2 и т. д. Нейрон N прилагает функцию активации (f) к этой сумме. Значение на выходе может быть получено на входе другими нейронами

Нейроны могут отличаться один от другого по своей функции активации и своему синаптическому весу. Разнообразные структуры нейронной сети могут быть использованы в соответствии с тем, для чего они предназначены. Наиболее простые структуры, такие как сеть, называемая «перцептрон» (*Perceptron*), состоят из одного пласта прямо входящих нейронов, соединенных с одним пластом выходных нейронов. Более сложные структуры состоят из нескольких слоев нейронов, соединенных один с другим каскадом. Иные

структуры приводят в действие связанные друг с другом нейроны, причем часть таких структур играет роль входных нейронов, а другая часть — выходных. В практической робототехнике нейронная сеть может выполнять роль управляющего, входящие нейроны будут при этом связаны с сенсорами робота, а выходящие — с его исполнительными механизмами.

Нейронные сети способны обучаться на основе опыта — как это будет показано в следующей главе, — поскольку они устанавливают отношения между сенсорной стимуляцией, доставляемой на входе, с моторными командами на выходе. Чтобы осуществлять это, они могут модифицировать значения своих функций активации, или значения своего синаптического веса, либо способ выполнения различных процедур. Правило Хебба (*Hebb*) управляет увеличением синаптического веса двух связанных нейронов, когда они активизируются одновременно и это пропорционально их прежним значениям активации. Это правило в приложении к обучению называется усвоением «по ассоциации».

Алгоритм обратного распространения (*rétropropagation*)* ошибки, который ведет к модификации синаптических весов на входах одного нейрона в соответствии с долей его участия в управлении ошибкой, комиссованной сетевым ансамблем. Это при условии, что возможно сравнить ответ, который сеть дает на данный стимул, с тем ответом, который она могла бы дать[†]. Этот механизм задействован в так называемом обучении «с подкреплением».

Перечисленные виды обучения будут более детально описаны в следующей главе. Существуют и другие, более продвинутые методы обучения. Они касаются модифицированных нейросетей, где не просто два нейрона обмениваются электрическими сигналами, но происходят

* Соответствующий английский термин «*Backpropagation*». Англоязычная справка из Интернета: «Обратное распространение, или распространение ошибки, — общий метод обучения искусственной нейронной сети преобразованию поставленной перед ней задачи». — *Прим. перев.*

[†] На самом деле здесь речь идет о разнице между ожидаемым ответом (стимулом) и получаемым ответом (стимулом — вознаграждением или наказанием), т. е. о пользе для обучения *ошибки предсказания*. Более подробное объяснение этого механизма см. в следующей главе: статья «Обучение через подкрепление», рубрика «И метод *Psikharpa?*»). — *Прим. перев.*

коммуникации, симулирующие химический обмен на более или менее длинной дистанции. Наконец, формальные нейроны, кратко описываемые здесь, могут быть заменены сущностями, чье функционирование максимально приближено к реальным нейронам. В частности, в растущем числе прикладных применений приводят в действие «разрядные нейроны» (*«neurones à décharge»*)*, способные передавать сигналы, похожие на потенциалы действия естественных нейронов.

Благодаря этой работе действительно был создан симулянт таракана, способный двигать своими шестью лапками, координируя эти движения, с тем чтобы перемещаться в своем окружении в поисках ароматной пищи, притом с успехом обходя встречающиеся препятствия. Препятствия и пища распознавались им благодаря тактильным и обонятельным сенсорам, связанным с двумя его антеннами. Степень съедобности пищи тоже могла быть оценена с помощью тактильных и химических сенсоров, расположенных на челюстях, и перерабатывалась за счет жевательных движений. Каждое из этих действий управлялось субсетью нейронов, и все подобные субсети были объединены в глобальную сеть — собственно архитектуру управления, обеспечивающую согласованное поведение. Сущность работы в том, что она внесла в разработку этой сети вектор на «выживание» анимата за счет избегания расхода своих энергетических резервов, уровень которых оценивается внутренним сенсором.

Аппетитивное поведение и поведение потребления

Этологи[†] определяют те виды поведения, которые связаны с активным поиском пищи или партнера как аппетитивное[‡] (фр. *appétitif*)

* Можно еще перевести как залповые нейроны, или просто как нервный импульс, нейронная активация. Есть вариант перевода «многозарядные нейропроцессоры». — *Прим. ред.*

† Специалисты по поведению животных. — *Прим. перев.*

‡ Поведение, направляемое желанием, предвкушением, аппетитом. — *Прим. перев.*

поведение. А сам процесс потребления пищи и репродукции называют поведением потребления.

Таракан-анимат *Periplaneta computatrix* в своих активных поисках ресурсов должен, помимо прочего, перемещаться и обследовать пространство. Шесть идентичных субсетей контролируют движения каждой из его ножек — для того чтобы анимат правильно поставил ногу на опору, толкнул ногу назад и потом перенес ее вперед перед тем, как снова поставить. Эти субсети координируются с помощью маленькой дополнительной сети, которая обеспечивает движение шести ног в соответствии с «треногим» ритмом — самым эффективным у насекомых: в определенный момент передние и задние ноги, расположенные с одной стороны тела, находятся на почве, тогда как средние ноги — наоборот. Когда анимату надо повернуть, нейроны, предназначенные для регуляции ритма, чуть больше активируют ноги, расположенные на одной стороне тела. Если таракан должен остановиться, формальные нейроны замолкают.

Другие субсети управляют обхождением препятствий и следованием на запах пищи: препятствия и запахи улавливаются тактильными и химическими сенсорами на антеннах. Еще один вид субсети контролирует знакомство с пищей — с помощью сенсоров на челюстях, а также управляет ее потреблением за счет жевательных движений.

Архитектура поглощения

Остается только координировать эти различные локальные сети, чтобы избежать, например, одновременного сочетания противоречивых видов поведения. В этой связи система контроля анимата *Periplaneta computatrix* была организована иерархически: когда одна субсеть была активна, возникала тенденция подавления всех других, находившихся на более низкой ступени иерархии. Система контроля, как принято говорить, их «поглощала».

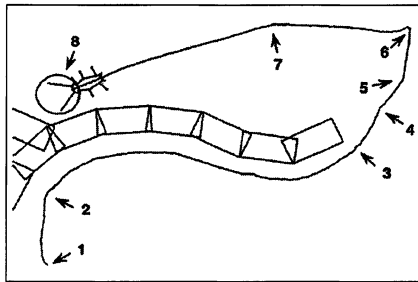
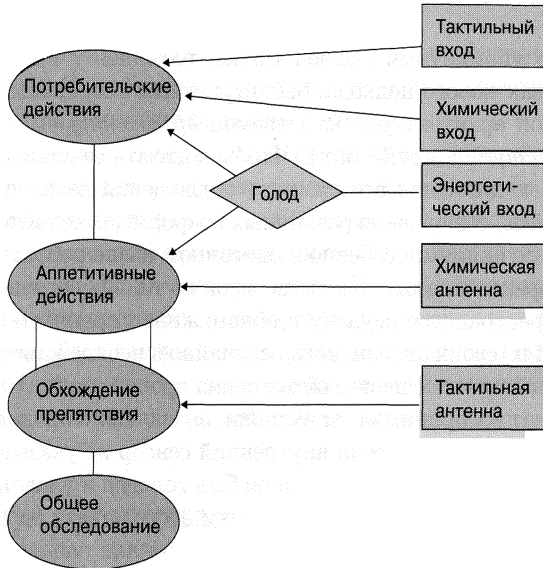


Рис. 8.2. Архитектура контроля поведения *Periplaneta computatrix* — искусственного таракана Рендала Бира. *Вверху:* архитектура поглощения симулята таракана *Periplaneta computatrix*. Каждая субсеть (овалы слева) в состоянии контролировать анимат, если она возбуждена одним или несколькими сенсорами (прямоугольники справа), при условии, что модуль более высокого уровня не принуждает ее оставаться неактивной. *Внизу:* (1) по умолчанию таракан стихийно обследует местность; (2) он почувствовал запах пищи, расположенной в пункте (8), и, поскольку он голоден, запускается поведение перемещения в сторону пищи; (2–3) обхождение препятствия сочетается с продвижением в сторону пищи. Таракан обошел стену, но, делая это, удалился от пищи и потерял ее запах; (4–6) он снова случайным образом обыскивает пространство за стеной; (7) неожиданно он оказывается в зоне, где снова чувствует пищу. Он направляется туда к окружности (8)

Именно упомянутый Родней Брукс, находясь у истоков взлета аниматов как нового подхода, был страстным теоретиком и защитником такой архитектуры, называемой *архитектурой поглощения* (англ. *subsumption architecture*). Чтобы доказать ее адаптивные способности, он применил архитектуру поглощения на впечатляющей серии роботов, совершенно различных по форме, сенсомоторной экипировке и функциям, особенно в описанном выше роботе *Genghis*.

Если таракан-анимат с такой «нервной системой» обследовал окружающее пространство наудачу и обнаруживал препятствие с помощью одной из своих антенн, тогда случайное, ненадежное перемещение *поглощалось* поведением обхождения препятствий. Аналогично, когда анимат воспринимал запах пищи, он спокойно продолжал свою текущую деятельность, если внутренний сенсор не указывал ему на недостаток энергии. Зато уж если он был голоден и улавливал запах съестного, он направлялся к источнику этого запаха за счет хемотаксиса. Затем, когда он устанавливал источник запаха (и если он при этом был голоден и удостоверился, что этот источник съедобен — по запаху и на ощупь), анимат прекращал перемещаться и включал жевательные движения, позволявшие ему подкормиться и пополнить свои запасы энергии. Но если одно или другое из этих условий не выполнялось, таракан не отвлекался от своего текущего образа действий и продолжал, смотря по обстоятельствам, либо вновь устанавливать градиент запаха, либо обходить препятствие, либо обследовать местность.

Архитектура управления анимата *Periplaneta computatrix* представляла собой удачный переход между системой контроля кибернетических роботов прошлого и системой «не канализированной» («*non câblées*») сегодняшних и будущих аниматов. Хотя она была полностью зафиксирована разработчиком, на деле она осуществляла адаптацию ради «выживания» искусственной системы, комбинируя управление своими рефлексам с принятием в расчет *мотивационной системы*, чье изменчивое состояние в любой момент определяет естественную склонность анимата выполнять тот или иной образ действий. Действительно, в соответствии с тем, что симулят таракана бывает мотивирован или не мотивирован на кормление (в зависимости от своих энергетических запасов), он не обязательно

выполняет некий определенный образ действий *при идентичных внешних условиях*. С этой точки зрения был проделан существенный шаг в сторону автономии искусственной системы.

Однако следует отметить, что в сравнении со строгой иерархией, предусмотренной Бруксом, Бир немного модифицировал принцип соподчинения на уровне взаимодействия между определенными субсетями. Это было действительно неплохо, что иногда два контроллера функционировали одновременно. Что касается архитектуры, задуманной в рамках этого новаторского положения или тех систем, которые разрабатываются в наши дни, то нам представляется, что их разработка есть дело в значительной степени эмпирическое — это искусство в не меньшей степени, чем наука. . .

Разум множества

Поскольку для координации простых рефлексов необходимо общее согласование поведения, как в случае с вышеописанным тараканом, это наталкивает на мысли о сообществах насекомых. Оказывается, что некоторые исследователи рассматривают эти сообщества как расширенные модели нервной системы, где отдельные особи выполняют роль нейронов, которые в результате интеграции реализуют общинную задачу. Вот это и есть *разум множества*.

Это выражение объединяет вместе ряд работ, стремящихся воспроизвести и объяснить феномены коллективных проявлений в организациях, подобных тем, что мы наблюдаем, например, у социальных насекомых. Эти последние, хотя и наделены ограниченным объемом мозгового вещества, прекрасно справляются с такими сложными строительными сооружениями, как улей, термитник или муравейник, — и все это без какого-либо вмешательства вышестоящего наставника, который руководит каждым индивидом, исходя из глобального видения продвижения к цели коллективной задачи. Можно предположить, по аналогии, что искусственная *мультиагентная* система, состоящая из простых единиц, выполняющих по отдельности простые действия, окажется способной осуществлять сложное

коллективное поведение. Такую систему называют *децентрализованной*, ибо здесь общая координация выполняется только за счет взаимодействий между агентами-участниками системы, при том что каждый агент имеет весьма ограниченное видение конечной задачи.

Применение принципов множественного разума очень существенно для робототехники. Вместо того чтобы создавать громоздких роботов, дорогих и очень сложных, множество маленьких роботов может с не меньшим успехом выполнять те же задачи. Тогда как малейшая неисправность имеет все шансы вывести из строя сложного единственного робота и оставить неосуществленной его миссию, неполадки в одном или нескольких участниках мульти-агентной системы не отразятся существенно на успехе выполнения коллективной задачи.

Неожиданное появление некой функции

Нужно ли в подобных системах тщательно программировать каждого отдельного участника, исходя из общего результата, которого они призваны добиться? Не всегда... Иногда этот результат нельзя предсказать интуитивно на основе предписанной каждому роботу начальной функции. Сей факт прекрасно иллюстрирует опыт дидаботов (*Didabots*), придуманных в Цюрихском университете в педагогических целях.

В этом эксперименте был использован ансамбль из четырех маленьких роботов на колесах. Каждый из них был снабжен двумя инфракрасными приемно-передающими станциями спереди с ограниченным радиусом действия. Роботы были изначально размещены по четырем углам арены, на которой были разбросаны маленькие очень легкие блоки из полистирола (*polystyrene*). Роботы перемещались в случайном порядке, иногда подталкивая маленькие блоки. Через некоторое время можно было убедиться, что дидаботы «упорядочили» блоки, собрав их в небольшие кучки. Если бы робототехники заранее задались целью придумать роботов, выполняющих такую функцию, они, несомненно, сочли бы необходимым заложить гораздо более сложную архитектуру управления, нежели та, которой были наделены эти роботы.

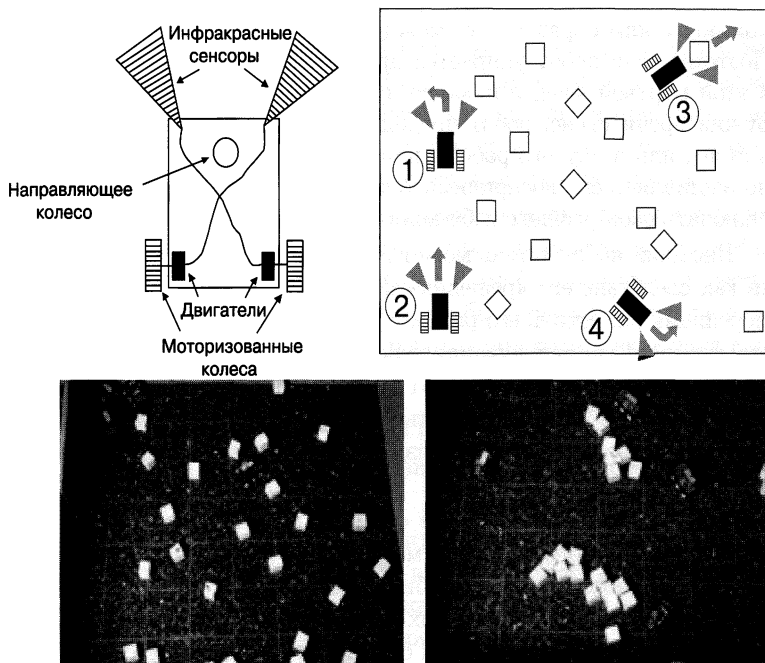


Рис. 8.3. Дидаботы. Вверху слева: один дидабот и его внешний вид. Вверху справа: (1) правый сенсор обнаружил препятствие (здесь — кубик), левый двигатель сразу замедлился, и робот повернул налево; (2) перед роботом нет никаких препятствий, и он движется прямо на максимальной скорости; (3) хотя кубик находится прямо перед роботом, тот его не воспринимает и движется по прямой, толкая перед собой кубик; (4) правый сенсор выявил препятствие (здесь — это стена), левый двигатель сразу замедлился, и робот повернул налево. Внизу: начало и конец реального эксперимента с дидаботами в Лего. (© Rolf Pfeiffer, Zürich University)

На деле, у каждого отдельного робота нет никакой программы, кроме *обхождения препятствий*, и получается, что выполняемая ими функция «упорядочивания» является своего рода *производственным дефектом!* Когда один из лучей, испускаемых роботом, определяет блок, другого робота или стену ограждения, это запускает в нем рефлекс избегания, приводящий к выполнению заднего хода

и поворота на четверть оборота в сторону. Однако его сенсоры расположены таким образом, что между ними существует мертвая зона. Поэтому, если робот упирается прямым в блок, тот оказывается в этой мертвой зоне, и никакие лучи его не улавливают. Не обнаружив препятствие, робот продолжает свой путь, пока не упрется в стену, или в другого робота, или в очередной блок. Это неизбежно заставляет его воспринимать то или иное препятствие и сразу включать свой рефлекс избегания.

Внешний наблюдатель может интерпретировать поведение робота как следствие его «решения» пойти поискать новый блок с «намерением» поместить его рядом с уже найденным. Но, естественно, эта функция упорядочивания совсем не была предусмотрена. Она есть не что иное, как результат деталей морфологии этих роботов, и она исчезнет, если упразднить мертвую зону между двумя сенсорами — без нее необходимость изменять что бы то ни было пришлось бы передать контроллеру.

В этом опыте дидаботы не обменивались никакой информацией и ничего иного не воспринимали, кроме известных препятствий. К тому же упорядочивание кубиков, возможно, с таким же успехом проделал бы лишь один из них, и тот факт, что их было четыре, совсем не обязательно ускорил бы процесс. Большее число роботов тоже не обязательно упростило бы выполнение этой задачи, с учетом того времени, которое они потеряли бы при столкновениях друг с другом.

Такой тип выработанных качеств (здесь — поведение упорядочивания), которое сочетается с ожидаемыми базовыми качествами (здесь — избегание препятствий) и которое прежде всего удивляет того, кто за всем этим наблюдает, а по завершении процесса толкает на поиск объяснений, — этот тип качеств называют *всплывающими* (*émergentes*). Появляясь в любой момент и в любых приложениях автономной робототехники, это явление иллюстрирует неоднозначность в понимании и организации отношений между структурой и функцией, порой очень сложных. Все искусство эмпирического подхода, описанного выше, состоит в том, чтобы разумно комбинировать эти всплывающие качества с рациональным выбором, необходимость которого заставила разработать ожидаемые качества.

Коллективное транспортирование

Мы говорим опять же о перемещении блоков, но уже довольно тяжелых для того, чтобы один робот мог сдвинуть его без посторонней помощи. Несколько простых правил, которые были применены на маленьких роботах в Университете Альберта⁵⁸, позволили им осуществлять такой коллективный перенос, или транспортировку.

Каждый робот был экипирован детектором препятствий и фоточувствительным сенсором, они разом определяли локализацию объекта, который надо толкать, поскольку тот был освещен, и место, куда его надо переместить, — оно тоже было связано с источником света. Управляющая поведением роботов программа включала следующие простые правила:

- перемещать стихийно, избегая препятствия;
- когда блок обнаружен, направляться к нему, обходя другие препятствия;
- при контакте с блоком уточнить, находится ли он между роботом и целью. Если так, то надо его толкать. Если блок не сдвигается или если угол толкания неверный, то надо заново перемещаться в случайном порядке.

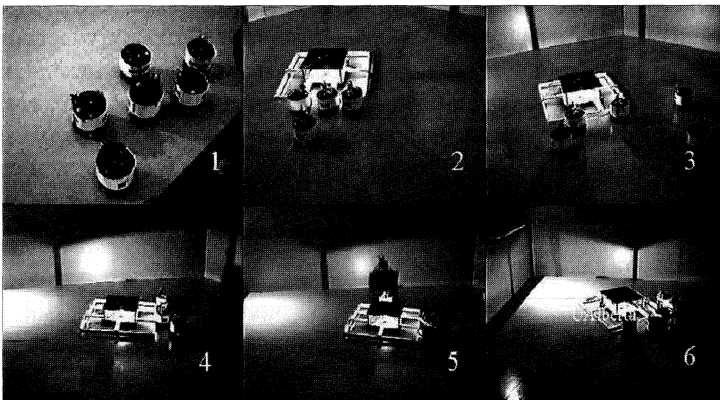


Рис. 8.4. Шесть роботов, объединенных одной задачей коллективной транспортировки. (© Ronald Kube, University of Alberta)

При этих условиях роботы стихийно перемещались в поисках контакта с блоком, взаимно избегая друг друга и обходя стены экспериментальной арены. Они случайным образом входили в контакт с блоком, но не начинали его сдвигать, пока как следует не убеждались в том, что направление толкания будет подходящим. В результате, хотя перемещение блоков было эпизодическим и перемежающимся, роботы всегда толкали их прямо к цели, без каких-либо прямых коммуникаций между собой.

Отметим в этой связи, что, как и в случае программ искусственного разума «форте», эти простые правила покоятся на множестве имплицитных знаний, заданных роботу *a priori* человеком-экспериментатором. Например, правило, позволяющее уточнить верность линии: робот–ящик–цель. Однако суть дела здесь состоит в том, чтобы выявить: какие простые реактивные механизмы, пускаемые в ход коллективно, способны заменить гораздо более сложный контроллер.

Групповое перемещение

Аналогичные механизмы могли бы регулировать перемещение больших объединений животных. Движение рыбьего косяка, перемещение стада бизонов, полет большой стаи скворцов происходят настолько слаженно, что это очень похоже на поведение единого, цельного организма. Их перегруппировки адаптивны, поскольку участники массового движения подвергаются большой опасности, исходящей от преследующих такие стаи хищников. Этологи полагают, что здесь тоже можно выявить определенные правила. Так, какой-нибудь марсианин был бы очень удивлен: каким образом наши автомобилисты умудряются разъезжаться на перекрестках Пляс де ля Конкорд* почти без столкновений и эксцессов, предположив, что тут, наверно, существуют какие-то правила.

*Пляс де ля Конкорд (*place de la Concorde*) — площадь Согласия в Париже. До Второй мировой войны называлась площадью Звезды (Этуаль), поскольку имеет лучевую форму — множество улиц стекается к ее центру. Отсюда нетрудно догадаться, что автомобильное движение там выглядит весьма сложным. — Прим. перев.



Один исследователь в области искусственного интеллекта из Массачусетского института технологии (MIT)⁵⁹ несколько лет назад нашел простой способ симулирования таких сложных коллективных феноменов. Его искусственные создания *Boids*, как и автомобилисты, следовали усвоенным правилам поведения. Эти правила были очень просты, немногочисленны (всего три) и базировались только на том, что *Boids* воспринимали в своем ограниченном визуальном поле. Они должны были:

- оставаться отделенными минимальной дистанцией от воспринимаемых сородичей или препятствий (правило отделенности);
- выравниваться вдоль средней линии ориентации воспринимаемых сородичей (правило выстраивания в линию);
- стараться держаться посередине между воспринимаемыми сородичами (правило сплоченности).

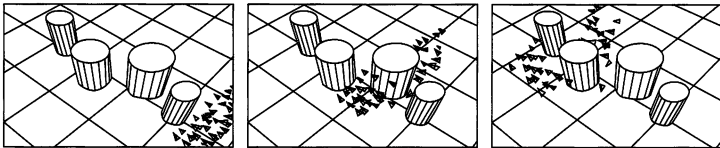


Рис. 8.5. Искусственные птицы *Boids*, чей координированный полет является «всплывающим качеством», следующим из простых правил. (По материалам Крейга Рейнолдса (*Craig Reynolds*))

Если эти правила соблюдаются одновременно всеми членами группы, они позволяют воспроизводить согласованные движения: согласованно выполнять резкие повороты и перегруппировки после обхождения препятствий или нападений хищника, — как это делает, например, косяк рыб.

Множество других коллективных феноменов — полет стаи птиц, передвижение стада буйволов — могут быть воспроизведены с помощью подобных простых правил. Кроме того, такие же правила были использованы для симуляции групповых эффектов в различных анимационных фильмах. Например, полет летучих мышей в фильме

«Возвращение Бэтмена» или бегство диких зверей в фильме «Король Лев».

Те же правила были с успехом применены к реальным роботам. Например, такого рода правила позволяют робототехникам сконцентрироваться на траектории, которую будет задавать один робот «лидер», тогда другие всегда будут группироваться вокруг него и продолжать движение.

За пределами простых рефлексов

У большинства живых организмов перевод сенсорной информации в моторные действия, осуществляемый нервной системой, не всегда сводится к простым рефлексам — один и тот же стимул не всегда порождает одинаковую реакцию. Благодаря работам психологов-бихевиористов Кларка Халла и Эдварда Толмена известно, что внутреннее состояние может вносить разнообразие в ответы, касающиеся одной темы. Мотивация, настроение, эмоции, убеждения, память о прошлом опыте, предвосхищение определенных событий — факторы, которые тоже могут значительно изменять внутреннее состояние и способствовать тому, чтобы животное или робот становились более адаптивными.

Очевидно, что рефлекс позволяет реагировать моментально на имеющиеся обстоятельства, скажем, — успеть отпрыгнуть, прежде чем упасть в яму. Зато память о прошлом опыте, если вы находитесь в знакомой местности, поможет вспомнить не только об этой яме, но и, например, о находящемся неподалеку ресторане. Аналогичным образом способности планирования и предвосхищения позволяют учитывать будущие последствия своих действий, дабы выбрать самый короткий путь к ресторану, притом благополучно минуя яму.

Разнообразные системы, снабженные рефлексам, уже были здесь описаны — рефлексам, которые были «канализированы» («câblées») разработчиками этих систем. Архитектура управления таракана-анимата *Periplaneta computatrix*, как мы видели, была задумана так, что заведовала одновременно рефлексам и мотивацией и могла

реагировать на внутреннюю и внешнюю перцепцию анимата. В следующих главах мы рассмотрим другие реализации, в которых способности к запоминанию или предугадыванию открываются спонтанно либо улучшаются — благодаря обучению, совершенствованию или эволюции, заимствованным у природных созданий.

ГЛАВА 9

ОБУЧАЮЩИЕСЯ РОБОТЫ

Поистине, я пришел, чтобы направить вас к Природе и к ее детищам, чтобы она была к вашим услугам, как рабыня.

Френсис Бэкон

Обучение есть процесс, благодаря которому новые сведения используются для модификации последующих реакций. Вслед за протоботами, служившими для проверки гипотез бихевиористов — Торндайка и Уотсона, было создано множество методов обучения искусственных систем. Особенно это касается использования формальных нейронных сетей, которые предоставляют значительные новые переломные позиции в этой сфере.

Три основных типа обучения, используемые в бионической робототехнике следующие: обучение через *подкрепление*, обучение посредством *имитации*, обучение по *ассоциации*. Проиллюстрируем эти три способа несколькими примерами (и некоторые из прежде описанных нами систем тоже в этом нам помогут). Мы не будем касаться четвертого типа обучения, который используется, скорее, интеллектуальными системами «быстрого» искусственного разума *GOFAI** и соотносится с *наставническим* обучением, когда функционирование системы может корректироваться инструктором, в любой момент указывающим, каким должно быть правильное функционирование. Этот метод мало применим к аниматам, поскольку естественное окружение редко требует столь точных повторений. При столкновении животного с препятствием это взаимодействие выражается в болевых или других негативных сигналах, но оно вовсе не

*Эта аббревиатура упоминалась ранее: *GOFAI* — *Good Old Fashioned Artificial Intelligence* — «старый добрый искусственный разум», иначе именуемый — искусственный разум «форте». — *Прим. перев.*

указывает ему, какое конкретное поведение следует предпринять для решения проблемы. Во множестве случаев от окружающей среды не исходят конкретные поведенческие стимулы, то есть сигналы — однозначно негативные либо позитивные.

Обучение через подкрепление

Этот способ обучения основан на принципе кнута и пряника или, более точно, — на бихевиористском* законе, уже немного испробованном на прото-роботах прошлого. В рамках этого подхода определенные действия анимата «вознаграждаются», а другие «наказываются». Такой тип обучения заключается в модификации параметров своей архитектуры управления и, тем самым, — своего поведения. В результате с течением времени действия анимата все чаще вознаграждаются и все меньше порицаются.

Брахияция

Такое обучение было осуществлено в работе *MLR III (Multi-Locomotion Robot III)*, разработанном группой сотрудников Университета в Нагойе (*Nagoya*)⁶⁰. Этот робот обучался методом проб и ошибок — и не только осваивая перемещение с помощью брахияции[†] (то есть балансируя на руках и цепляясь за ветки, переходя с одной ветки на другую, как гиббон), но также учился ходить на четырех или двух конечностях, как горилла. Выбор локомоторного движения, наиболее адекватного при данных обстоятельствах окружения или для определенной поставленной задачи, может позволить оптимизировать мобильность робота. Робот *MLR III* представляет собой синтез гиббона *Brachiator III* и гориллы *Gorilla Robot III*. Ростом

*То есть на основной формуле психологии бихевиоризма: стимул — реакция. Более подробный постраничный комментарий о бихевиоризме см. в главе 5, статья «Прото-роботы». — Прим. перев.

[†]По-французски «*la brachiation*» — это специальный научный термин. Самое близкое слово «*brachial*» является анатомическим термином, означающим «плечевой», «ручной». — Прим. перев.

в один метр и обладая руками более длинными, чем ноги, он приближался к морфологическим характеристикам этих приматов. Он был снабжен двумя камерами на месте глаз и захватами на концах своих рук. Захваты имеют пять степеней свободы, ноги — шесть степеней, а бедра — две степени свободы.

Для человека было бы невозможно безошибочно «вручную» просчитать все параметры архитектуры управления робота ради прямой имплантации ему всех сенсомоторных координаций, востребованных столь мультилокомоторной задачей. А робот, опираясь исключительно на свой опыт, может усвоить различные способы локомоторных движений — одно за другим, чтобы потом с достаточным основанием отобрать те, которые он будет использовать.

Если управление четвероногой и двуногой ходьбой — задача совсем не простая, то брахиация — в не меньшей степени. Робот усвоил этот способ передвижения, подвешиваясь на перекладинах лестницы, расположенной горизонтально на определенной высоте. Упражнение заключается в раскачивании нижней части тела, достаточном для того, чтобы сделать рывок к следующей перекладине, которую робот хватает одной из своих клешней, отпустив перекладину, которую он держал другой клешней. Обучение состоит в нахождении подходящей амплитуды раскачивания, подходящих циклических движений рук и, наконец, подходящего момента, когда перекладина должна быть отпущена и захвачена, при этом важна информация, получаемая камерами-глазами — информация о расстоянии между перекладиной и клешней. Цель робота — минимизировать эту дистанцию. Движения, соответствующие большим расстояниям, «наказываются», а соответствующие маленьким расстояниям — «вознаграждаются».

Находясь под тщательным присмотром собственных создателей, которые ловили своего драгоценного (во всех смыслах) робота всякий раз, когда он промахивался мимо перекладины, робот неплохо напрактиковался в этом сложном упражнении и мог пройти по всем перекладинам горизонтальной лестницы, ни разу не упав, даже при произвольном расположении перекладин.

Два других способа локомоции осваивались в той же манере. Следующий этап работы — робот должен научиться выбирать оптимальный способ передвижения: наиболее подходящий природе имеющегося окружения и экономящий энергию, от которой он зависит.

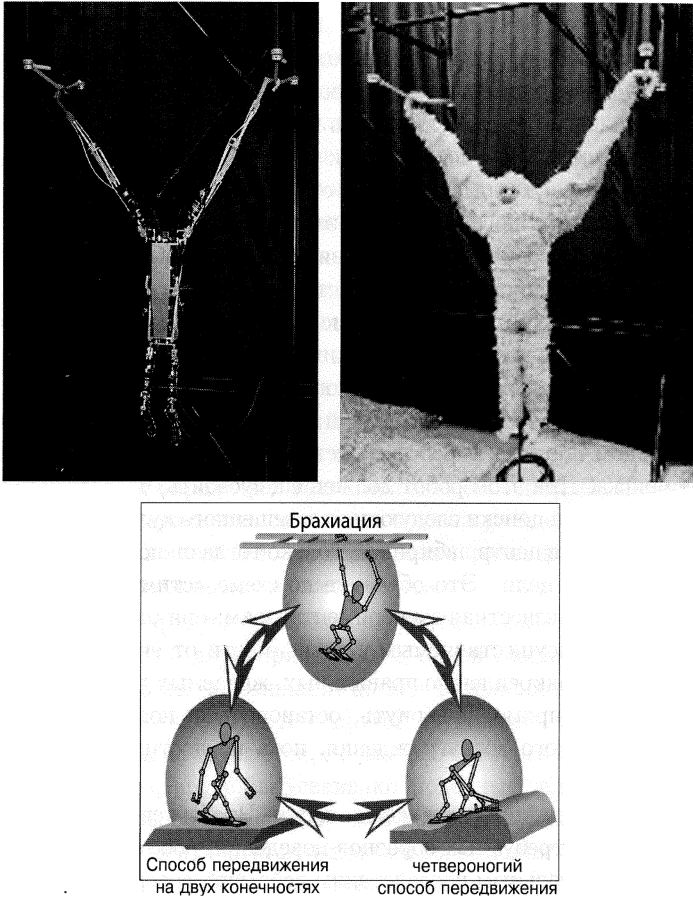


Рис. 9.1. Робот *Brachiator III* и робот *MLR III (Multi-Locomotion Robot III)* *Вверху:* робот *Brachiator III* (без облачения и в своей меховой одежде) учится перемещаться от перекладины к перекладине. *Внизу:* мультилокомоция робота *MLR III* позволяет ему, в зависимости от обстоятельств, выбирать между разными способами передвижения: на двух ногах, брахиально или на четырех конечностях. (© Toshio Fukuda, Nagoya University)

И метод *Psikharpax*?

Вернемся к роботу-крысе *Psikharpax*, созданному в нашей лаборатории. Один из вариантов этого робота ради обогащения его возможностей сейчас пытается освоить методом проб и ошибок задачу, которая кажется более легкой. Как и бесчисленные поколения живых лабораторных крыс до него, он должен подойти к одной из ветвей крестообразного лабиринта, задняя стенка которой освещена. Там он получит вознаграждение в виде капель воды, выделяемой из условного раздатчика. Предполагается, что, как и его живые лабораторные сородичи, робот должен испытывать жажду в момент эксперимента (перед экспериментом животным не дают воды), чтобы у него возникла мотивация поиска этого места. Как только он достигнет цели, освещается днище другой ветви лабиринта — выбранной в случайном порядке, и робот может снова предпринять очередной опыт поиска. При этом робот должен еще усвоить, что, прежде чем отправляться на поиски следующего освещенного кулуара, надо сначала вернуться в центр лабиринта, только тогда он получает «питье» по достижении цели. Это обучение по схеме «стимул-реакция» — модель хорошо известная экспериментаторам: они ставят робота перед выбором, осуществляемым в зависимости от его мотивов (что способствует подкреплению правильных, желаемых действий), — например: идти прямо, повернуть, остановиться, попить. Робот не получает никакого вознаграждения, пока не достигнет цели (раздатчика воды).

Эта задача не так проста, как кажется. Чтобы усвоить всю последовательность требуемых образцов поведения, робот должен содействовать желательным последствиям действий, совершая их в определенном порядке, тогда он получает вознаграждение. Сложность состоит в том, что вознаграждение появляется с большой задержкой, когда вся должная последовательность уже выполнена, поскольку робот получает награду только в конечной точке, достигнув цели, — далеко от отправной точки. Находясь в конце пути, он должен прийти к «пониманию», какие из совершенных им действий, среди всех прочих выполненных им в этом пространстве, приводят к желаемой награде. Это те действия, которые он предпринял только что,

находясь уже у цели? Или те, которые осуществил чуть раньше? Или награда определяется тем, что совершалось в точке отправления? Его способность к запоминанию не позволяет ему удерживать в памяти все последствия действий, которые привели его к какому-нибудь месту в лабиринте и были вознаграждены. Требуется, чтобы он применил постепенный, пошаговый метод улучшения своего поведения — инкрементальным* (пошаговым) способом, не будучи обязанным запоминать все последовательности своих прошлых действий.

Среди решений, которые предусмотрены для проблем такого типа, специалисты по информатике предлагают архитектуру, называемую *исполнитель-критик*. Она состоит из двух модулей: в зависимости от текущей сенсорной информации «исполнитель» решает выполнять ли соответствующее действие, а критик оценивает вознаграждение, которое нынешний выбор повлечет в будущем. При этих условиях «исполнитель» в любой момент выбирает то действие, которое критик определяет как самое многообещающее, и обучение подразумевает сравнение ожидаемого вознаграждения с тем, которое было реально получено, таким образом, разница между одним и другим с течением времени уменьшается.

Если такой архитектурой интересуются создатели аниматоров, то это происходит по двум причинам. С одной стороны — поскольку она не предполагает запоминание последовательности всех действий, закончившихся успехом. А с другой — потому, что она, как ни странно, похожа на тот способ, с помощью которого млекопитающие, особенно крысы, вроде бы усваивают подобные задачи. Так, в самом центре нервной структуры, именуемой базальными ганглиями[†], роль исполнителя и роль критика могли бы выполнять две отдельные части полосатого тела (стриатума), являющегося функциональным компонентом базальных ганглиев. Действительно, нейрофизиологи обнаружили, что одна из этих партий — критик — управляется

*Инкрементальный — связанный, соотносящийся по значению с существительным «инкремент»; пошаговый, увеличивающийся постепенно. — *Википедия*: <http://ru.wiktionary.org/wiki>

[†]Базальные ганглии — подкорковые ядерные структуры (своего рода узлы серого вещества, среди белого вещества подкорки), лежащие в толще больших полушарий мозга, почти в его центре. — *Прим. перев.*

нейронами, секретирующими особенный нейромедиатор *дофамин*, который воздействует на исполнителя. Нейрофизиологические методы регистрации показали, что эти нейроны активируются так, как если бы они вели счет ошибкам предсказания получаемого вознаграждения. Изначально при получении неожиданного вознаграждения они активируются, но затем, по мере того, как они снова и снова получают вознаграждение в тех же условиях, всплеск их электрической активности постепенно угасает. Зато, если животное ожидает вознаграждения, а оно не приходит, то дофаминэргические нейроны демонстрируют еще меньшую активацию — со значениями ниже базовой активации, ибо ошибка предсказания здесь имеет «противоположный смысл». Итак, модель исполнитель – критик, задуманная специалистами по информатике, была уже создана эволюцией примерно 230 миллионов лет назад!

Функционирование этого типа нейронов и организация базальных ганглиев вдохновили, в широком смысле, архитектуру управления виртуального *Psikharpaх*'а. Он выполнял задачу в крестообразном лабиринте. После очень трудоемких попыток в конце концов его действия стали успешными, аналогичную картину можно наблюдать у реальных крыс. В моменты успеха обучения робот, на самом деле, поначалу был «приятно удивлен» появлением вознаграждения, когда он, достигнув цели впервые, решил совершенно случайно «попить». Выделение дофамина в действующей части (исполнителе) его виртуального «полосатого тела» (стриатума) изменило там некоторые значения синаптического веса, вследствие чего повышается вероятность, что он впредь будет систематически выбирать те же действия при тех же обстоятельствах. Затем, то локомоторное действие, которое он совершил непосредственно перед тем, как попить (переместился пряником к раздатчику воды), будет подкреплено тем же способом. То же относится ко всем желательным («правильным») действиям, которые предшествуют этому и которые в результате оказываются эффективными — начиная от точки отправления (каждый раз разной) и вплоть до того места, где робот получает вознаграждение. И роботу нет никакой необходимости «стараться» поминутно «вспоминать» всю последовательность совершенных им действий, все это будет впредь записано посредством тех самых измененных значений синаптического веса.

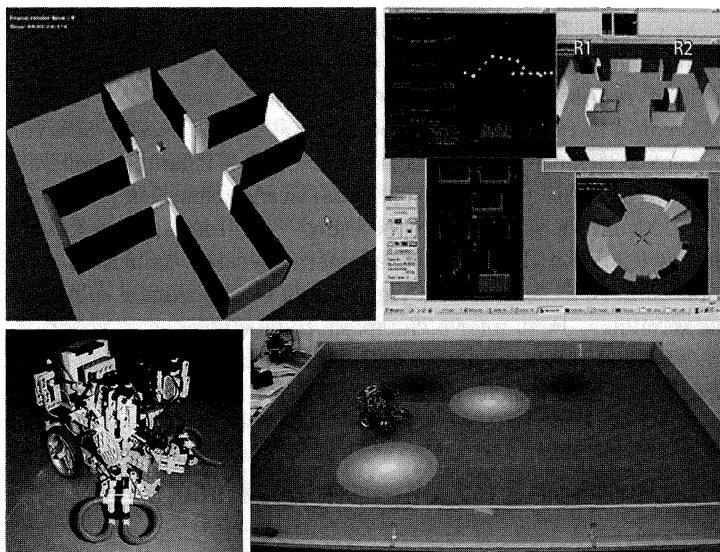


Рис. 9.2. Территории робота-крысы *Psikharpa* и его «превращения». *Вверху слева:* виртуальный крестообразный лабиринт, в котором *Psikharpa* (он представлен здесь в одном из своих перевоплощений — коммерческий робот) обучается по схеме стимул-реакция. Вознаграждение размещено в глубине «освещенной» ветви слева от робота, и с каждой новой попыткой место меняется случайным образом. *Вверху справа* (четырёхчастная картинка): когда *Psikharpa* находит два типа источников (*R1* и *R2*) в своем окружении (верхний правый угол), экспериментаторы могут наблюдать за его собственной картиной ситуации (нижний правый угол) — за тем способом, каким он конструирует пространственное представление (верхний левый угол) и его способом выбора своих действий с учетом его мотивации (нижний левый угол). *Psikharpa* «без колебаний» выбирает идти к *R1* или к *R2*, когда его мотивы подталкивают к этому. (© *Loïc Lachèze et Mehdi Khamassi, AnimatLab, LIP6 & ISIR*) *Внизу:* этот же эксперимент был повторен в реальности роботом Лего (еще одно воплощение *Psikharpa*'а), снабженным всего двумя сенсорами освещенности. Черные и белые зоны соответствуют двум типам источников *R1* и *R2*. (© *Benoît Girard et Vincent Cuzin, AnimatLab, LIP6*)

Такая же архитектура, заимствованная у нервных структур, позволяет равным образом реальному роботу выбирать свои действия в зависимости от двух мотивов, которые заложили в нем его разработчики: потребность пойти «подкрепиться» энергией в специальные места и потребность ее «переварить», чтобы сделать доступной для употребления, — в других местах. Следуя сиюминутной значимости каждого из этих мотивов, робот всегда способен решить, что делать, и пойти в одно или второе место — в автономном режиме, без помощи человека. В противоположность другим механизмам выбора эта биомиметическая система управления не порождает «поведенческие метания». Речь идет о синдроме Буриданова осла, который не может выбрать между двумя одинаково насущными нуждами: подойти к овсу или к воде, пока не околеет от голода и жажды.

Обучение с помощью подражания

Только те приматы, которых называют высшими — некоторые обезьяны и человек, — способны к подражанию. В 1990 году группа итальянских нейробиологов⁶¹ задалась целью разработать это качество с использованием активности специфических нейронов, называемых *зеркальными*. Они находятся преимущественно в коре лобных долей мозга и, похоже, представляют собой интерфейс между наблюдением и действием — между движением воспринимаемым и движением исполняемым.

В предыдущие десятилетия на макаках было показано, что зеркальные нейроны активизируются, не только когда животное само выполняет какое-то движение, но и тогда, когда оно воспринимает, как это движение выполняет кто-то другой или даже когда ожидает, что оно сейчас будет выполнено. Это открытие⁶² подразумевает, что природная или искусственная система может извлекать информацию из тех движений, которые она воспринимает, без их практической реализации. А потом еще может их воспроизвести — поскольку зоны подготовки этих движений активны. Эти принципы были применены таким образом, что человек просто «показывает» роботу способы

выполнения новых действий, без необходимости роботу их неустанно практиковать. Если говорить упрощенно, обучение происходит примерно так. Сначала робота надо снабдить определенным репертуаром элементарных двигательных функций, ассоциированных с воспринимаемыми. Например, смотреть на человеческую руку, описывающую кривую линию, и присоединять этот жест, смотреть на человеческую руку, движущуюся по прямой, и присоединять этот жест и т. д. Потом человек выполняет более сложные движения, состоящие из нескольких предыдущих элементарных: скажем, рисует рукой прописную букву «В». Робот же должен распознать в потоке этих восприятий те элементарные жесты, к которым он уже приобщился, затем усвоить сообразно им фигуру, изображаемую человеком. Так, в данном случае сначала человек изображает вертикаль, затем, переместившись вверх, рисует одну полукруглую кривую, потом вторую такую же. Робот сможет даже дополнять собственную имитацию, широко модифицируя первичные элементарные движения.

Многие работы посвящены обучению роботов посредством имитации. Они в большей или меньшей степени инспирированы нейрофизиологическими открытиями. Например, творение Оды Бийард (*Aude Billard*) — исследователя из Политехнической школы Лозанны. Ода Бийард — одна из первых в этой области. Она создала куклу по имени Робота, с визуальными и слуховыми сенсорами. Рот куклы-робота может шевелиться, плечи тоже движутся, а руки способны хватать. Кукла умеет имитировать простые жесты, выполняемые перед ней человеком. Например, поднимает руку, поворачивает голову или делает оба жеста одновременно. Робота даже может вступать в общение со своим визави, она говорит простые фразы по-английски, пока еще немного отрывистые, вроде: «мо-ё имя Ро-бо-та».

Помимо своего вклада в прогресс сферы обучения искусственных систем посредством имитации, кукла Робота привлечена к программе обучения детей, страдающих аутизмом. Эта программа называется *AuRoRa* (*Autonomous mobile Robot as a Remedial tool for Autistic children*).

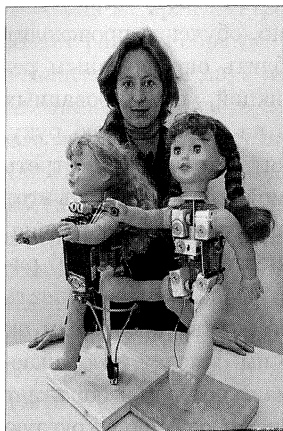


Рис. 9.3. Ода Бийард (*Aude Billard*) с двумя прототипами своей куклы Роботы. (© *Alain Herzog*, Федеральная политехническая школа Лозанны.) (См. цветную вклейку)

Для детей-аутистов характерна недостаточная способность к имитации, связанная с их трудностями в общении, что, вероятно, объясняется дисфункцией зеркальных нейронов. Соответствующие исследования предполагают вовлечь этих детей в игру, позволяющую им учиться имитации для улучшения навыков социальной интеграции. Предполагается, что кукла поможет им в имитации, и предсказуемое поведение робота очень облегчает эту задачу. Упомянутая программа не претендует на то, чтобы излечить аутизм, но она позволяет уточнить некоторые особенности поведения, чего трудно достичь с помощью других методов.

Обучение по ассоциации

Третий способ обучения — из тех, что относят к обучению *без наставника* (супервизора), касается ситуаций, где окружение не дает системе никакой информации о значимости выполняемых системой действий или приобретенных знаний. Речь идет, например, о таких знаниях: система усвоила, что кусты — обычно меньше деревьев; что, в отличие от других птиц, страус не летает; или что, когдаходишь на свою кухню, есть много шансов там найти свой холодильник. Ассоциирование определенных характеристик происходит благодаря пережитому опыту, и никакие наказания и вознаграждения не связываются с достигнутыми результатами.



Категоризация объектов

Именно так маленький робот на колесах, снабженный панорамной камерой и одним захватом, учился распознавать два типа объектов в своем окружении — цилиндры большого и малого диаметра. Любой человек тут же увидел бы разницу в размерах этих цилиндров. Однако робот, вместо того чтобы использовать свою камеру, идентифицирует объекты по ассоциации с количеством оборотов своего колеса при движении вокруг них. Информация, поставляемая его сенсорами, называется одометрической*. В результате он классифицирует объекты по двум категориям «короткое перемещение» и «длинное перемещение». И поскольку робот, помимо прочего, пытался много раз поднять опознаваемые объекты, он добавил к первой категории еще одну характеристику «можно поднять», а ко второй — «невозможно поднять». С этого момента, когда он встречает любой объект из разряда «длинное перемещение», он даже не пытается ухватить его своей клешней. Это обучение не такое уж простое, ибо требует многих предпосылок. Например, надо знать, в какой момент полный круг вокруг цилиндра завершен. Однако оно иллюстрирует тот факт, что представление о мире, выработанное человеком, животным или роботом, зависит от его сенсомоторной экипировки. Нам очень трудно себе представить, что мы делали бы, если бы у нас была такая же морфология, как у этого робота и если бы мы были снабжены такими же сенсорами и двигательными органами (исполнительными механизмами). Ведь наша естественная склонность полагаться в первую очередь на зрение — наиболее развитый орган чувств у нас, приматов. Исходя из этих соображений, очень важно предоставить роботу возможность сконструировать свою собственную модель мира, дабы избежать ловушек, которые всегда готов расставить наш антропоцентризм.

Ориентироваться в незнакомом месте

Эта форма обучения по ассоциации используется и в тех приложениях, где локализация и навигация робота вдохновлены особенностями нервной системы грызунов.

* От слова «одометр» (путемер, шагомер). — *Прим. перев.*

Они живут в среде, гораздо более сложной, чем пустынные муравьи, и поэтому наделены более разнообразными механизмами определения своего местоположения. Известно, что на протяжении последних двух десятилетий биологи накопили значительный объем сведений о том, как крысы⁶³ определяют свое местоположение и ориентируются в пространстве. Специалисты пришли к убеждению, что эти животные выработали внутреннее представление о своем окружении — иногда именуемое *ментальной картой*, или *когнитивной картой*⁶⁴. Сверяясь «ментально» с этой картой, крысы могут выбирать самые короткие пути следования и избегать опасных мест.

Это ментальное представление основано на функционировании специализированных нервных клеток: *клетки местоположения*⁶⁵, *клетки направления головы*⁶⁶ и *клетки решетки* (или клетки сетки)⁶⁷. При активации этих нейронов сигналы от различных сенсоров воспринимаются, ассоциируются и интегрируются в виде визуальной, обонятельной, звуковой и проприоцептивной информации.

Клетки местоположения позволяют крысе определить свою локализацию в окружающем пространстве. На самом деле, при исследовании незнакомого пространства крыса усваивает, что определенная конфигурация стимулов (то, что она видит, слышит, чует и осязает) характеризует определенное место, а другая конкретная конфигурация — другое место. Связи между нейронами при этом усиливаются или ослабляются таким образом, что отныне тот или иной ансамбль клеток местоположения будет возбуждаться, при повторении конкретной конфигурации. Согласно тому, какой ансамбль (паттерн) клеток местоположения активируется, крыса знает, где именно она сейчас находится.

В соответствии со своим названием *клетки направления головы* возбуждаются только в том случае, когда голова животного ориентирована в каком-то особом направлении, независимо от локализации самой крысы в пространстве. Каждая из этих клеток представляет максимальную активацию для данного направления головы, называемую направлением предпочтительного (нейронного) разряда. Аналогично клеткам местоположения клетки направления головы тоже осуществляют комплексную интеграцию информации, приходящей от разных сенсорных каналов. Например, активность клеток на-



правления изменяется, когда какой-нибудь очень очевидный ориентир оказался перемещенным или когда крыса ощущает, посредством своего вестибулярного аппарата, что основание, на котором она сама стоит, перемещается.

Клетки решетки активируются в местах, отстоящих друг от друга на регулярных дистанциях. Каждая клетка «покрывает» окружающее пространство своего рода решеткой (или сеткой), узловые пересечения которой соответствуют определенным местам, где данная клетка активизируется. Размер «ячеек» таких сеток варьирует от одной клетки к другой. Таким образом, даже при полном отсутствии сенсорных данных эти клетки позволяют животному верно определить свою локализацию. А самое удивительное, что решетки адаптируются к окружению любых габаритов и форм.

Эти три типа клеток, активируясь адекватным образом в незнакомом пространстве, обучаются необыкновенно быстро, опираясь на рассмотренные выше нейронные механизмы пространственных представлений. Таким вот образом составляется карта и используется крысой для эффективного перемещения не только днем, но и ночью — поскольку обонятельная, звуковая, тактильная и проприоцептивная информация имеют здесь такое же значение для системной интеграции, как и визуальная.

Робототехники несколько лет назад взяли на вооружение эту систему ориентации, определения своего местоположения и расстояния. Поскольку она не требует высокоспециализированных сенсоров вроде телеметрических лазеров, применение которых, к тому же, возможно не в любых условиях. Вызов состоит в том, чтобы воплотить обучение по ассоциациям, соответствующим надлежащим сенсорным данным, за счет применения трех видов нейронной активации, которые мы только что рассмотрели. Другая задача заключается в том, чтобы объединить вместе всю эту информацию, дабы она сложилась в согласованную систему.

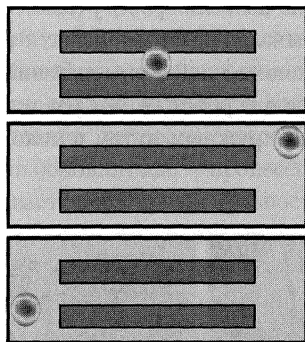
Одна из первых биомиметических моделей навигации, принявшая эти вызовы, была предложена Анжело Арлео (*Arleo*) в пору его работы в Федеральной политехнической школе Лозаннны, а затем он продолжил исследования в Университете Париж 6. Маленький мобильный робот был экипирован панорамным видением посредством сотни

инфракрасных сенсоров, а также одометрической системой, считающей обороты колеса и заменяющей таким образом проприоцептивные рецепторы живой системы. В результате робот мог конструировать «ментальную карту» своего окружения — квадратной арены со стенами, покрытыми черными и белыми полосами, напоминающими штрих-код. В одном месте находился источник света, он оставался включенным на протяжении всего эксперимента. Когда робот входит в это незнакомое ему пространство, он инициализирует свое чувство направления по отношению к абсолютному направлению, которое он выбрал произвольно. Во время своего исследования окружения робот учится коррелировать наиболее заметные визуальные признаки (например, источник света) с этим выбранным направлением. Оказавшись снова в том же пространстве, он может уже не брать в расчет свое абсолютное направление (вместе с тем ярким признаком), а опираться на согласованное представление о своем местонахождении.

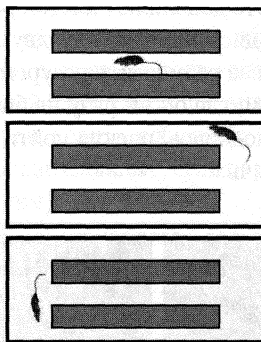
По нашим данным, сейчас робот находится на пути создания клеток местоположения, он занимается систематическим описанием циклических экскурсий, начиная от точки отправления, как это происходит у живых крыс. Во время таких патрулирований местности он ассоциирует различные точки своей локализации с данными своей внутренней и внешней перцепции.

Он, кроме того, извлекает пользу из увязывания своих последовательных локализаций по ходу маршрута — ради выработки внутренней карты, которую называют *топографической*. Эта ментальная карта связывает разные места без точного установления соответствующих им расстояний — как схема метро, где реальным расстояниям между станциями не придают особого значения. Такое пространственное представление, будучи однажды сформировано, позволяет знать, куда направиться, чтобы достичь какого-нибудь места в лабиринте с разными точками отправления. А именно: помогает пойти кратчайшим путем в места, уже исследованные, но опираясь на сложившиеся в памяти ориентиры, включающие места, где робот прежде не был.

Активация трех клеток местоположения



Соответствующая локализация (крысы)



Направления предпочтительного
(нейронного) разряда одной
из клеток направления головы

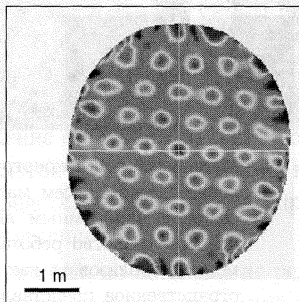
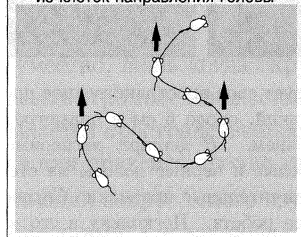


Рис. 9.4. Клетки местоположения, направления головы и клетки решетки.

Вверху: допустим, лабиринт состоит из двух параллельных перегородок в центре прямоугольного пространства. По мере того как крыса перемещается в лабиринте, определенные клетки местоположения активируются в ее мозге, а другие — нет. Так, регистрация активности клеток местоположения (колонка слева) показывает, в каком месте лабиринта должна находиться крыса (колонка справа). Темно-серые пятна в левой колонке обозначают зону, где клетки очень возбуждены, светло-серый цвет — где клетки менее активны, а средне-серый указывает на совершенно пассивные зоны. *Внизу слева:* принцип работы клеток направления головы. Одна из этих клеток активируется только тогда, когда животное держит голову в определенном направлении; а другая клетка — только тогда, когда голова ориентирована в другом направлении, и так далее — для всех возможных направлений. *Внизу справа:* одна отдельная клетка решетки активируется (сильно — темно-серые зоны; меньше — светло-серые зоны; совсем нет активации — средне-серые зоны) всякий раз, когда крыса перемещается на определенное расстояние по отношению к последнему месту, запустившему предыдущую активацию этой клетки. Какая-нибудь другая клетка при этом активируется в местах, расположенных ближе друг к другу, а третья предназначена для более дистанцированных друг от друга мест и т. д.

Все это дополняют клетки решетки, позволяя роботу (вместе с понятием дистанции между двумя отпечатавшимися в памяти местами) точнее разместить ресурсы. Он сможет найти кратчайший путь даже там, где он ни разу не был. Прежде робот не мог реализовать что-то подобное, рискуя пойти к цели кружным путем и никогда ее не достичь.

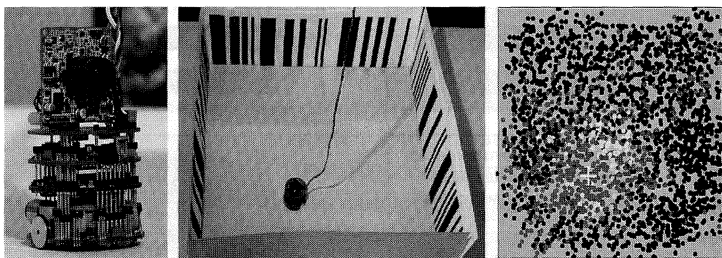


Рис. 9.5. Маленький робот конструирует свое пространственное представление. *Слева:* совсем маленький, около 6 см в диаметре, робот снабжен панорамным видением. *В центре:* экспериментальное пространство робота; белые и черные полосы на стенах он может использовать как отличительные признаки. *Справа:* пространственное представление робота. Поскольку в его «мозге» активированы определенные клетки местоположения, а другие пассивны (цвета красный, желтый, голубой и синий обозначают, соответственно, степень активации: сильную, среднюю и слабую или нулевую), робот «знает», где он находится. Примечательна согласованность между зонами, активированными на его ментальной карте, и местом, где робот находится сейчас, оно действительно оказывается в глубине карты. (© Angelo Arleo, Федеральная политехническая школа Лозанны). (См. цветную вклейку)

И снова *Psikharpax*?

Psikharpax использует пространственное представление и в настоящее время имеет в своем распоряжении разнообразные стратегии навигации, которые может упражнять и днем и ночью — благодаря единой когнитивной карте, а также реактивные стратегии —

без помощи карт. Обе эти формы ему необходимы, поскольку они взаимно дополняют друг друга. На самом деле, хотя обладание ментальной картой предоставляет много преимуществ, оно может иметь и свои недостатки. Карта задействует большое множество формальных нейронов, способных производить собственную обработку и обновляться, — процессы довольно сложные, если окружение оказывается обширным (разносторонним).

Вот почему там, где карту придется конструировать долго и трудно, *Psikharpax*'у полезно иметь возможность положиться на реактивную стратегию. Скажем, такую как *таксис*. Таксис заключается в опоре на последовательные визуальные признаки (вроде тех, что *Psikharpax* воспринимал в крестообразном лабиринте). Или на другую стратегию — *праксис*, она заключается в запоминании последовательности движений (допустим: повернуть три раза подряд налево, потом один раз — направо). Правда, выбирать этот тип стратегии уместно, лишь когда окружение остается тем же. Бесполезно привлекать огромное множество клеток серого вещества, на которых основывается пространственное представление, тогда как привычки таксиса или праксиса прочно утвердились...

Есть один вопрос, много изучавшийся, но пока еще не решенный нейробиологами. Он заключается в понимании того, какие в точности механизмы лежат в основе выбора между этими разными стратегиями: опираться или нет на ментальную карту. Множество моделей, разрабатываемых в настоящее время в *AnimatLab** с другими партнерами, призвано ответить на этот вопрос.

Коллективное обучение

Используя разом и обучение с подкреплением, и обучение по ассоциации, роботы Говорящие Головы (англ.: *Talking Heads*) парижской

*Это упоминавшаяся выше исследовательская группа, к которой принадлежат и авторы книги. — Прим. перев.

лаборатории *Sony CSL** коллективно выдумывают словарь⁶⁸. Эксперимент направлен на «изучение того, как языки возникают на основе языковых игр (шуток), применяемых агентами, на месте которых могут быть роботы или программный продукт». Цель исследования в долговременной перспективе — помочь роботам научиться понимать друг друга, а также (почему бы и нет?) — способствовать коммуникации между роботом и человеком.

Два робота, «говорящий» и «слушающий», наделенные видеокамерами, общаются по поводу цветных форм на картинке. Многие характеристики этих форм, например размер, геометрия, интенсивность цвета и т. д., а также их расположение (справа, сверху и т. п.), могут восприниматься и анализироваться этими роботами. Для связи одного слова с той или другой характеристикой используется набор слов. Будучи попеременно «говорящим» и «собеседником», они рассматривают форму и конструируют упрощенное представление, а также могут ассоциировать это представление с составленными случайным образом слогами (например: *wa-ka-bi* или *ta-ka-ne-na*). Во время взаимодействия говорящий сообщает одно из этих слов собеседнику с тем, чтобы тот идентифицировал нарисованную форму. Например, если на картине представлен красный квадрат наверху слева, зеленый круг посередине и синий треугольник внизу слева, один говорит другому: «*ta-le-wi-na*», что означает «наверху-слева-красный». Исходя из этого признака, собеседник пытается догадаться, какая форма выбрана, и указывает говорящему свой выбор, направив камеру к одному из объектов. Если он указывает правильный объект, то говорящий впредь будет использовать это слово чаще. В противном случае собеседник просто запоминает использованный термин. Когда этот процесс повторяется очень много раз, у двух роботов возникает общий словарь, не имеющий никакого смысла для стороннего наблюдателя.

Этот эксперимент был повторен множество раз, даже в музеях и дистанционно — в Интернете. В нем участвовали и реальные и виртуальные роботы, а иногда и люди. Эксперимент показал,

*Научная компьютерная лаборатория фирмы *Sony* (*Sony Computer Science Laboratory*). — Прим. перев.

что лексика и система распределения категорий может возникать в процессе очень локальной интеракции (взаимодействия) между агентами и что словарь может эволюционировать постоянно, например когда новички интегрируются в популяцию.

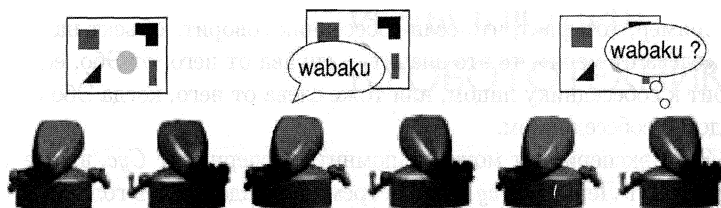
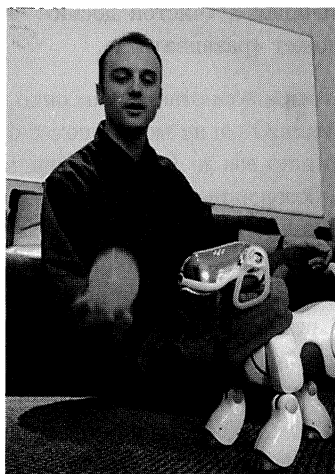


Рис. 9.6. Эксперимент с Говорящими Головами (*Talking Heads*). Слева направо: два робота «смотрят» на картинку с символическими изображениями разной формы и цвета, помещенными в различных позициях. «Говорящий» робот произносит некое слово, которое он ассоциирует с одной из фигур на картинке. «Слушающий» робот должен угадать форму, выбранную его собеседником

Рис. 9.7. Робот Эбо, его мяч и его учитель.
(© Frédéric Kaplan, Sony Computer Science Laboratory.) (См. цветную вклейку)



Аналогичное обучение предполагалось для Эбо (*Aibo*) — говорящего робота-собаки фирмы *Sony*. Человек указывает пальцем на красный мяч и говорит роботу «Посмотри, мяч». В окружении этого

робота-собаки имеется много красных предметов. И человек показывает ему те, которые не являются мячами, а потом снова указывает на мяч — множество раз и с разных углов зрения. И на вопрос «Что это такое?» Эбо уже может ответить — «мяч», даже если это зеленый объект. Кроме того, он усвоил некоторые тонкости знания. Например, тот факт, что если собеседник говорит: объект находится «слева от меня», то это значит — справа от него, от Эбо, если он стоит к собеседнику лицом, или тоже слева от него, когда Эбо стоит рядом с собеседником.

Этот эксперимент может напомнить эксперимент *Сус*, в ходе которого Дуг Ленат (*Doug Lenat*) стремился «вдолбить в голову» компьютеру тот самый общий смысл и научить его общаться на естественном языке. Однако если результаты Говорящих Голов и кажутся скромными, они от этого не менее интересны: здесь смысл некого слова возникает с минимумом человеческого вмешательства. Исследователи видят в таком протоколе способ изучения того, каким образом когнитивные или другие способности могут возникать, начиная с «чистой доски». Иначе говоря, каким образом система может «развиваться».

ГЛАВА 10

РАЗВИТИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ

*Вы подходите к Природе с теориями,
Природа опрокидывает их все.*

Пьер-Огюст Ренуар

Развитие

В отличие от Афины или Диониса, ни одно многоклеточное животное не появилось на свет в совершенно законченном виде. Органическое развитие (образно говоря — начиная с яйца), и все стадии ранних событий жизни организма имеют адаптивное, приспособительное значение. Анатомическая конструкция организма связана с его физиологией, позволяющей ему успешно противостоять бесчисленному множеству факторов, проявляющихся при взаимодействии со средой внешней и внутренней. Таким именно образом каждый организм моделирует себя в соответствии с той экологической нишей, в которой ему предстоит жить. И на его развитие будет влиять социальный и физический опыт, который данный организм будет претерпевать. Экологическая ниша тоже изменяется с течением времени. Вот почему развитие этого организма будет отличаться от развития его сородича с таким же набором генов, независимо от того, родился ли этот сородич в тот же период или немного позже. Влияние окружения на генетическое родовое достояние привносит

поведенческую и морфологическую вариабельность, она и служит гарантией выживания видов.

Морфологическое развитие роботов остается мечтой робототехников. Некоторые пытаются ее реализовать по аналогии с эволюцией видов, как мы увидим дальше. Следующие примеры касаются только развития архитектур управления.

Эбо на развивающем коврике

Очень интересная программа развития была проведена исследователями⁶⁹ парижской лаборатории *Sony CSL*, уже упоминавшейся в описанном выше эксперименте с Говорящими Головами. Эта программа стала следствием ограниченных возможностей Эбо в усвоении речи. Он не мог преодолеть предел в 20 слов, которые он ассоциировал с окружающими предметами. Эбо, как рассеянный ученик, не мог сконцентрировать свое внимание на указываемом объекте, кроме тех случаев, когда исследователи двигали этот предмет в его поле зрения. Таким образом, они решили использовать «любопытство», робота, чтобы позволить ему самому выбирать, что он «хочет» усвоить.

«Мозг» Эбо экипирован двумя воспринимающими модулями: один служит для предсказания последствий его действий, а второй — для предсказания качества прогноза первого модуля. То, что здесь именуется «любопытством», есть стремление робота выбирать то действие, которое вносит наибольший вклад в улучшение качества прогноза. Представим себе, например, что Эбо может нажимать на три кнопки, и в результате этого на экране появляются изображения. При нажатии на первую кнопку — простой фиксированный крест; при нажатии на вторую появляется крест, перемещающийся в длину, сначала по одной диагонали, потом по другой, а при нажатии на третью возникает «снег» — светящиеся точки, загорающиеся в случайном порядке и постоянно меняющие свое место. При стихийном надавливании на эти три кнопки его чувство любопытства сначала заставит его нажимать много раз на первую, поскольку то, что при этом появляется на экране, будет легко предсказуемым, и, таким образом, обучение Эбо будет продвигаться быстро.

Затем, когда больше нечего будет учить, он примется нажимать на вторую кнопку, ибо положение креста здесь труднее предсказать и он может «надеяться» тут кое-чему научиться. Когда он научится предсказывать траекторию движущегося креста, он начнет нажимать на третью кнопку, но вскоре прекратит это занятие, «поняв», что спонтанная позиция светящихся точек непредсказуема, и что даже дополнительные усилия научиться этому тщетны.

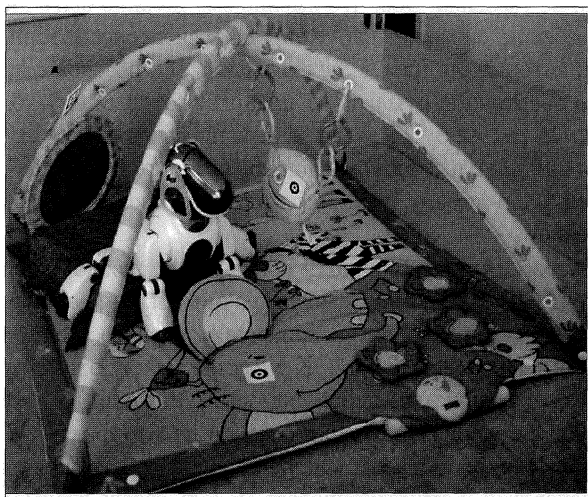


Рис. 10.1. Эво на своем «пробуждающем коврике» учится развивать поведенческий репертуар. (© Frédéric Kaplan, Sony Computer Science Laboratory.) (См. цветную вклейку)

Предоставленный самому себе на детском развивающем коврике, Эво исследует сенсомоторные последствия различных действий, которые он совершает. Например, двигает лапой, открывает пасть, ударяет подвешенный объект, тявкает и т.д. Выбранное действие всякий раз оптимизирует его обучение. Подобно маленькому ребенку, он какое-то время испытывает особый интерес к определенному действию, повторяя его множество раз подряд, а потом внезапно

бросает это занятие и переходит к другому. Так, постепенно он разработал свой двигательный репертуар, усвоил, что подвешенный предмет может качаться, если по нему ударить лапой, и еще его можно покусывать, и что если тявкнуть, когда входит экспериментатор, то это повлечет за собой. . . его ответное тявканье (разработчики выбрали такой способ коммуникации с роботом). Однако этот тип обучения имеет свои недостатки: Эбо не оценил, что было бы интересно научиться биться о стены. . .

Никто не указывал Эбо, что именно ему должно быть интересно. Словно ребенок, он может вдруг обращаться к сенсомоторным ассоциациям, которые он прежде не связывал. Так ребенок с интересом возится с оберточной бумагой от подарка, который ему только что вручили. Он так же будет очень быстро пресыщаться в тех случаях, где обучение дается слишком сложно, но благодаря этим экспериментам он мало-помалу расширит диапазон своих взаимодействий с окружением.

Его разработчики собираются посадить на игровой коврик двух Эбо — притом один из них будет более опытный, чем другой. Способности имитации ускорят расширение моторного (двигательного) репертуара «наивного» робота. К тому же между этими двумя роботами может возникнуть первичная коммуникация.

Интерес в подобном обучении основан на том факте, что любой робот может таким образом построить свой собственный поведенческий репертуар и структурировать модель своего взаимодействия с миром. На самом деле только он один способен разработать эту модель, потому что человек-разработчик не может поставить себя на его место, ведь он не располагает ни таким же телом, ни такими сенсорами, ни такими действующими органами. Это обстоятельство в начале XX века прекрасно понимал биолог Якоб фон Икскуль* (*Uexküll*), приписывая каждому организму представление о мире, сконструированное только им самим, — его собственный мир⁷⁰ —

* Якоб Иоганн Икскуль (нем. *Jakob Johann von Uexküll*, 26 августа (7 сентября) 1864, Кеблас, Эстляндская губерния — 25 июля 1944, о. Капри) — биолог, зоопсихолог и философ, один из основателей зоосемиотики и биосемиотики. — *Википедия*

каждый объект этого мира имеет свою собственную *функциональную тональность*⁷¹.

Позднее психолог Джеймс Дж. Гибсон формализовал эту идею несколько иначе, используя термин «*affordance*»⁷² (атрибутивность). Термин отражает тот факт, что воспринимаемое нами обычно соответствует действию, связанному с данным объектом. Для человека восприятие стула связано с тем, что на нем можно сидеть или стул может служить подставкой, чтобы дотянуться до высокого предмета. . . Атрибутивность (*affordance*) субъекта связана с его сенсомоторной экипировкой и ее спецификой: муха не делает различий между стеной, потолком и паркетом, поскольку может ходить по любой из этих поверхностей, чего никак не мог бы делать человек. Атрибутивность, к тому же, индивидуальна: одна и та же лестница одному человеку кажется преодолимой, а другому непреодолимой — в зависимости от его состояния.

Стадии развития

Следующий ряд работ посвящен разработке и изучению более характерных для человека методов сенсомоторного развития.

Робот *Cog*, созданный в Массачусетском институте технологий (MIT)⁷³, и робот *Babybot* Университета Генуи (*Gênes*)⁷⁴ стали моделями для изучения сенсомоторного и когнитивного развития человека. Они инспирированы нейрофизиологическими и психологическими теориями. В частности, здесь использована теория швейцарского психолога Жана Пиаже о стадиях развития мышления ребенка. Два упомянутых робота не имеют ног, а только головы и торс с руками, причем у *Cog*'а — две руки, у *Babybot*'а — всего одна. Они обеспечены визуальными, слуховыми, вестибулярными, кинестетическими и тактильными сенсорами. Их «мозги» состоят из нейронных сетей, имплантированных во множество компьютеров, работающих параллельно.

Таким образом, исследователи придали этим роботам неопределенно гуманоидные черты, но не для того, чтобы повторить ошибку разработчиков «старого доброго искусственного разума», стремившихся создать робота столь же разумного, как человек. Человеко-

подобие служило для оценки принципа развития когнитивных представлений, которые «заякорены телесно»*, — чтобы развить сенсомоторные и когнитивные человеческие способности. В этих целях лучше иметь человеческую морфологию.

Развитие этих роботов — инкрементальное (пошаговое). Первая стадия состоит в освоении ими собственной «схемы тела»: то есть в отделении своего тела от остального окружения. Потом они смогут перейти ко второй стадии: обучению через взаимодействие с объектами. Это поможет им добраться до третьей стадии, заключающейся в понимании отношений между объектами.

По мнению разработчиков, эти роботы уже достигли уровня развития возможностей ребенка между 6 и 18 месяцами. Телесная схема усвоена за счет установления связи между телесными движениями и восприятием их результата с помощью различных сенсорных модальностей. Здесь, конечно, возникает проблема интеграции, упомянутая нами прежде. Например, *Cog* в некотором роде научился пользоваться кистью руки, когда исследователи шевелили пальцами его руки и когда это движение своих пальцев робот воспринимал через различные информационные сенсоры: проприоцептивные, визуальные, тактильные. Затем *Cog* научился хватать предметы, потом провожать объект глазами, выбирать один из объектов, когда перед ним движется несколько, а также смотреть на тот объект, на который человек указывает пальцем. В свою очередь, *Babybot* научился хватать объект и приспосабливать различным образом это свое движение в соответствии с ощущением от этого объекта: тяжелый он или легкий. Он научился узнавать объекты, которые уже встречал ранее, даже если видел их под другим углом. *Babybot* поворачивает голову по направлению к звуковому объекту и может следовать за ним глазами. Он усвоил, что круглые объекты могут катиться, в отличие от кубических предметов, которые надо толкать, чтобы сдвинуть с места. *Babybot*, кроме того, научился распознавать движение экспериментатора, нацеленное на толкание такого же кубика.

* Речь идет о связи психического развития с практикой реальных действий и, соответственно, спецификой строения тела и сенсорными возможностями. — *Прим. перев.*

Группы, работающие в рамках этих проектов, присоединились еще к одному: конструированию *ICube* — робота, похожего на двух-летнего ребенка, который будет обладать разом всеми возможностями *Babybot*'а и *Cog*'а, а также будет наделен задними конечностями. Он сможет тогда учиться перемещаться — сначала ползать, потом ходить на четырех лапах, потом — на двух, как сообщают его разработчики.

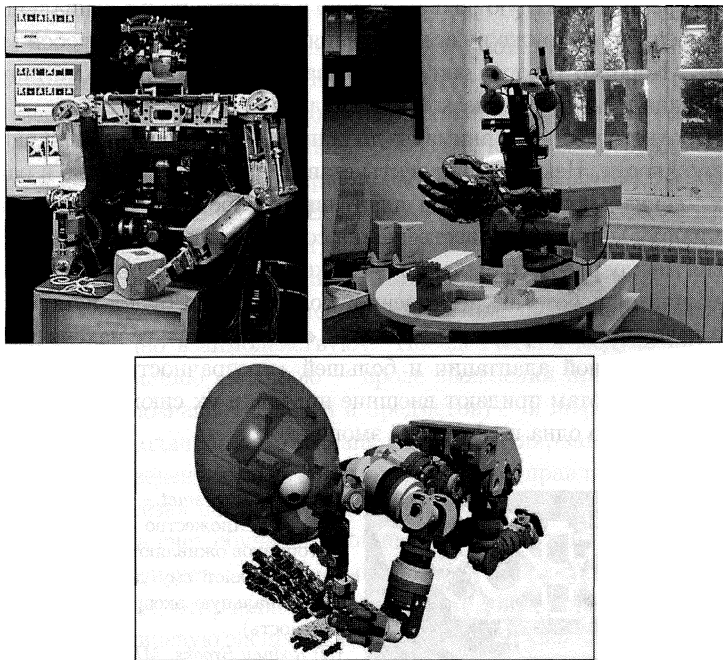


Рис. 10.2. Различные робототехнические платформы с точки зрения сенсомоторного развития. Вверху слева: *Cog*. (© Rodney Brooks, MIT Computer Science and Artificial Intelligence Lab). Вверху справа: *Babybot*. (© Giulio Sandini, University of Genova). Внизу: будущий *ICube*. (© Giulio Sandini, University of Genova). (См. цветную вклейку)

Эмоциональное развитие

Говорить о радости землеройки или о грусти угря — это скорее дело поэзии, а не науки. Однако многие ученые сходятся на том, что все позвоночные и, возможно, еще головоногие моллюски переживают — каждый в своем роде — эмоциональные состояния. С тех пор как Антонио Дамасио⁷⁵ — профессор неврологии из Университета Айовы (Iowa) провозгласил «ошибку Декарта», принято считать, что эмоции играют решающую роль не только в выживании и в социальных отношениях, но также во всех решениях, принимаемых в любой момент. Коротко говоря, они играют важнейшую роль в адаптации индивида в своей физической и социальной среде.

Соответственно, и аниматы должны бы получить аналогичные возможности. Некоторые проекты ставят именно такую цель в рамках «социального» развития адаптивных роботов. Эти программы направлены преимущественно на совершенствование взаимодействия между роботами и людьми. Поскольку будущих пользователей домашними роботами, несомненно, больше всего будет пугать то, что невозможно определить, в каком «настроении» те находятся... Для социальной адаптации и большей «прозрачности» для своих ближних роботам придают внешние признаки их сиюминутного состояния — это одна из функций эмоций.

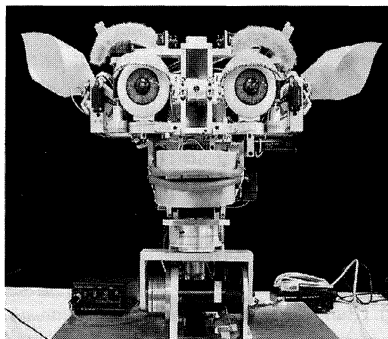


Рис. 10.3. *Kismet* — выразительная голова. Множество восприимчивых моторчиков оживляют лицо *Kismet*'а, что позволяет ему демонстрировать эмоциональную экспрессию (выразительность).

(© Rodney Brooks, MIT Computer Science and Artificial Intelligence Lab)

Дабы изображать переживание человеческих эмоций, надо быть антропоморфным. Группа Проекта социальных машин Массачусет-

ского института технологии (MIT)⁷⁶ разработала робота *Kismet* — выразительную голову, снабженную сенсорными входами: зрением, слухом и кинестезией. Он может издавать звуки, поворачивать голову, глаза, двигать бровями, ртом, и таким образом создавать впечатление, что он рассержен, испытывает отвращение, страх, радость, удивление, интерес, грусть, скуку или возбуждение. Исследователи заимствовали знания о развитии ребенка, чтобы научить робота тому, какие именно эмоции предпочтительно выражать в тех или иных обстоятельствах. Сейчас *Kismet* уже умеет с интересом следить глазами за человеком, начиная с того момента, когда тот вошел в комнату. Он распознает интонации его голоса и может соответственно менять тон своих собственных вокализаций. Он выражает печаль, когда на него ворчат, и — радость, когда его подбадривают. Если к нему очень быстро приближается какой-то объект, то *Kismet* выражает страх или гнев. Если какая-то игрушка ему более не интересна, он перестает уделять ей внимание и стремится вовлечься в разговор с кем-нибудь из присутствующих.

Его архитектура управления задействует шесть модулей, которые постоянно взаимодействуют. Поведенческий модуль интегрирует информацию внешнюю — вроде выявления простых характеристик (распознавания людей и предметов) — и информацию внутреннюю, исходящую из мотивационного модуля, заведующего эмоциями. Поведенческий модуль постоянно отправляет результаты своего «синтеза» всем сенсорам, а также мотивационному модулю, чтобы тот, за счет обучения, мог в любой момент изменить подход, который реализует. Одновременно поведенческая система контролирует команды, отправляемые различным двигателям. И они сразу выражают лицевую экспрессию и придают его «вокализам» соответствующий ситуации тон большей или меньшей интенсивности.

Интеракции *Kismet*'а с его человеческим окружением оставляют впечатление естественного поведения, поскольку робот проявляет себя в такой манере, которая согласована с адекватными эмоциональными сигналами. Взамен он оказывает влияние на поведение своих собеседников, подобно тому, как это происходит в обычном человеческом общении. Помимо этих успехов ученые преследуют более фундаментальную цель. На самом деле, похоже, что такая форма

коммуникации позволяет в любой момент оценить, насколько хорошо развертывается то обучение робота, которое он сейчас осуществляет. Например, если интенсивность того или иного эмоционального выражения чрезмерна (или чересчур вялая) с точки зрения данной ситуации, наставники робота могут немедленно изменить тип взаимодействия, чтобы добиться соответствующей выраженности. Таким образом, они находятся практически в тех же условиях, что и родители, констатирующие, что их ребенок слишком рьяно выражает свои эмоции, тогда родители могут, в соответствии с контекстом ситуации, незамедлительно донести до ребенка информацию о необходимости изменить его реакцию.

Эмоциональное обучение *Kismet*'а не закончено. Ныне его поведение поддерживает множество компьютеров, необходимых для калькуляции его громадных нужд. И нет сомнения, что, осваивая каждую совершенно новую эмоцию, он будет реагировать смесью удивления, страха, грусти и возбуждения...

Эмоциональные роботы распространились во множестве лабораторий. В качестве примера упомянем ассоциацию *HUMAINE (Human Machine Interaction on Emotion)*, которая объединила немало интернациональных исследовательских групп, и недавний европейский проект *Feelix-growing (FEEL, Interact, eXpress: a Global approach to development With INterdisciplinary Grounding)*, ставящий целью развить взаимодействие человек – робот через выражение эмоций.

Японские исследователи интенсивно разрабатывают программы роботов-гуманоидов, взаимодействующих с людьми. Одна из причин этого интереса — общее старение населения, которое делает необходимым создание домашних роботов для людей преклонного возраста. В настоящее время японские инженеры стремятся к максимальной похожести робота на человека. Например, профессор Хероши Ишигуро (*Heroshi Ishiguro*) из университета в Осаке создал робота-клона, копирующего внешность женщины-диктора японского телевидения — с ее разрешения. Это робот — *Repliee Q2*. Его силиконовая кожа снабжена множеством сенсоров. *Repliee Q2* изображает дыхательные движения, мигает глазами, владеет широким многообразием выражений лица и двигает своими руками и кистями очень натурально. Эта женщина-робот умеет отвечать на короткие

вопросы — знает приблизительно 2000 ответов и способна поддерживать разговор с человеком. При этом она использует адаптированную к своему собеседнику эмоциональную экспрессию лица и жестикуляцию, имитируя то, что воспринимает от него.

Закрепляя успех, Ишигуро создал своего собственного клона-робота... утилитарный гаджет для заполнения своего рабочего места, когда он сам уезжает по делам!

Однако научный интерес этих разносторонних поисков пока очень ограничен, ибо эти роботы лишь поверхностно изображают мины и эмоции. Антонио Дамасио и множество других исследователей, убеждены, что на самом деле, демонстрируя лишь внешние аспекты поведения, такие роботы остаются неспособными внутренне переживать чувства.



Рис. 10.4. «Клоны» профессора Ишигуро. Слева: женщина-робот *Replicoid Q2* (© *Hiroshi Ishiguro, Osaka University et Kokoro Co., Ltd*) Справа: профессор Ишигуро (он слева) и Геминиоид — его клон (он справа — если только не наоборот...). (© *Hiroshi Ishiguro, ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories, Osaka.*) (См. цветную вклейку)

Эмоции у живых систем играют гораздо более фундаментальную роль, не зря они возникли в ходе эволюции наряду со специфической анатомией и физиологией организмов. Их инновационная функция позволяла совершенствовать адаптацию. Действительно, с течением

времени среди миллиардов и миллиардов возможных конфигураций организмов, их нервных и гормональных систем именно эмоции оптимально уточняют сенсомоторные функции и нужды организма в его особой экологической нише.

А исследователь, работающий с коммерческим роботом, часто находится в ситуации создателя, который получил животное, полностью оснащенное, но лишенное системы контроля. Как придумать так, чтобы все сенсорные и моторные органы были эффективно соединены? И мы вскоре увидим, что различные виды обучения могут помочь уточнить детали функционирования одной архитектуры управления, дабы улучшить эффективность ее сенсомоторного контроля. Однако эти методы имеют свои ограничения, поскольку обширная часть пространства возможных конфигураций не была исследована. Эту лакуну, возможно, могли бы заполнить эволюционные, или эволюционистские, методы.

Эволюция

Эволюционистские методы ведут счет с 1960-х годов, с вдохновленной Джоном Холландом (*Holland*) группы исследователей из Мичиганского университета, затем последовали другие разработчики — американские и немецкие. Они стремились определить принципы оптимизации, заимствуя их у способа эволюции живых созданий — способа, которому три с половиной миллиарда лет. Цель этих исследователей была двоякой: лучше понять процессы адаптации видов и задумать искусственные системы, используя те же приемы. Эволюционистские методы оказались очень эффективными. По словам Джона Холланда, они могут разрешать «проблемы, которые их разработчики не понимают до конца».

И только в 1990-е годы, вместе с массовым производством современных компьютеров и в эпоху взлета аниматов, эти методы заняли свое место среди адаптивных подходов к искусственным системам. Их использовали преимущественно для разработки архитектур

контроля или, с недавних пор, — для разработки эффективной морфологии роботов.

Эволюционистские методы

Существует много эволюционистских методов. Среди них наиболее актуальны те, что объединяют в группу «генетических алгоритмов». Генеральный принцип этих методов — рассматривать проблему как экологическую нишу, в которой индивиды должны выжить, а индивидов рассматривать как решения (более или менее адаптированные) этой проблемы.

В каждом поколении огромные множества индивидов предлагают решение проблемы — некоторые решают ее немного лучше других. Качество каждого из этих решений можно взвесить и оценить с помощью селективной значимости* (*fitness* — по-английски). Как всякий живой организм, индивиды (предлагаемые решения) имеют генотип и фенотип (1). Генотип в целом определяется «хромосомой», включающей множество генов, где каждый представляет кодированную часть решения, которое претерпевает трансмиссию от поколения к поколению (1 а). Фенотип выражает это решение и служит тем самым для оценки селективной значимости (1 б).

Первое поколение индивидов характеризуется теми хромосомами с включенными в них генами (2), которые им достались по наследству, как по жребию. Кодирование этих генов — деликатная операция, ибо от этого сильно зависит эффективность алгоритма. Определенным индивидам из этого поколения позволено будет «воспроизвести»

* Авторы используют здесь выражение «*valeur sѐlective*», которое можно перевести еще как «селективное значение», или «отборочная стоимость (ценность)». Справка из французской Википедии: «*La valeur sѐlective (fitness, successeur reproducteur ou valeur adaptative) ...*» «Селективная значимость (другие названия: *fitness*, репродуктивный успех, адаптивное значение) — центральное понятие теории эволюции. Оно описывает способность индивида с определенным генотипом к воспроизводству. Это средство естественного отбора...». — Прим. перев.

себя. Отбор индивидов происходит по жребию*. Он касается индивидов, представляющих лучшие фенотипические экспрессии (то есть хорошие селективные значения), но также и индивидов, представляющих меньшие селективные значения (3, 4). Действительно, известно, что они необходимы для поддержания генетического разнообразия, позволяющего появляться хорошим будущим потомкам.

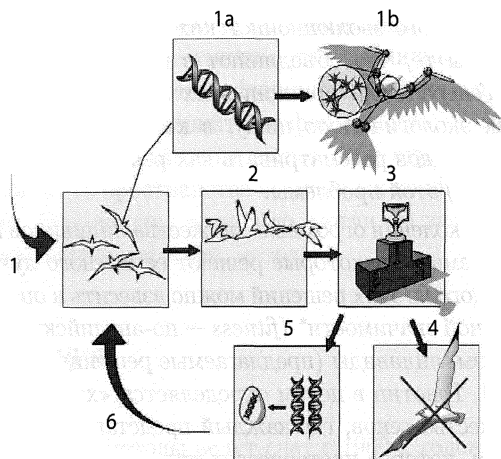


Рис. 10.5. Принципы генетических алгоритмов. (© Jean-Baptiste Mouret, AnimatLab, LIP6 & ISIR)

В результате репродукции индивидов, их хромосомы и их гены могут модифицироваться под действием генетических операций, таких как перекрест и обмен участками хромосом (*crossing-over*) — операция состоит в произвольном переплетении хромосом от двух «родителей»⁷⁷, — а также под действием мутации — стихийной замены одного гена другим (5). Эти два механизма позволяют порождать новые решения, по сравнению с родительскими, еще лучше соответствующие поставленной задаче.

Хромосомы, полученные благодаря «репродукции» родителей, формируют генотип потомков следующего поколения, чья селектив-

* Авторы используют здесь идиоматическое выражение «*tirer au sort*», которое переводится как «бросать жребий». — Прим. перев.

ная значимость для предполагаемого решения будет, в свою очередь, оценена. И так далее, до тех пор, пока не перестанет проявляться прогресс в разрешении значимой проблемы (6).

Мы узнаём здесь — в очень карикатурном виде — принцип естественного отбора эволюционной теории Дарвина, немного приукрашенный генетическими открытиями XX века, о которых не ведал английский натуралист.

Лучший способ ходьбы...

В лаборатории *AnimatLab* мы заставляли развиваться нейронные сети, контролирующие поведение различных роботов, реальных или симулированных. Один из подходов, которому мы следовали, состоял в кодировании в генотипе этих роботов правил развития их нервной системы. Эти правила описывались древовидной программой. Ее инструкции указывали, например, следующее: создать или ликвидировать нейрон, соединить его с другим нейроном или только изменить параметры его внутреннего функционирования. Несколько программ такого типа создавали случайное («по жребию») наследование инструкций развития. Эти программы, кроме того, порождали нейронные сети, которые станут «мозгом» (архитектурами управления) аниматов первого поколения. В каждом поколении наиболее адаптированные индивиды — то есть имеющие сильные селективные значения — «репродуцировались» и передавали своим потомкам новые программы развития. При этом происходил генетический обмен одной ветви дерева развития от одного родителя, с другой ветвью, исходящей от другого родителя, и к тому же мутации могли в случайном порядке поменять одну инструкцию на другую.

Применение такой логики позволило, например, произвести за два последовательных этапа нейронные контроллеры локомоций и обхождения препятствий у Секта (*Sect*) — нашего робота-насекомого с шестью ногами. Открытие каждого типа поведения поддерживалось за счет приобретенной им селективной значимости и за счет применения адекватных сенсоров. Так, в течение первого этапа, где

селективная значимость робота оценивалась с учетом пройденной им дистанции за определенный промежуток времени, были порождены сети нейронов, координирующие движения ног. Они позволяют роботу перемещаться по прямой линии согласно описанному выше трехпалому ритму.

Испытание сети производит искусственная эволюция. В результате порождается это проявленное поведение, которое предполагают генераторы колебаний (осцилляторы) — иначе говоря, нейроны, которые периодически самоактивируются при отсутствии внешних стимулов — такие как *центральные генераторы паттернов**, или *CPG*⁷⁸, обнаруженные биологами в нейронных локомоторных цепях позвоночных.

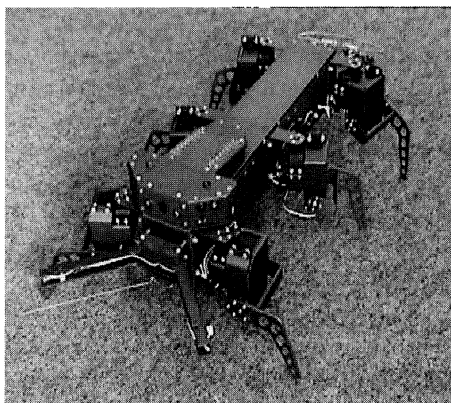


Рис. 10.6. Благодаря эволюционистским методам Сект научился ходить, а также избегать препятствий и следовать градиенту света.

(© Jérôme Kodjabachian и David Filliat, AnimatLab, LIP6)

На протяжении второго этапа развития другая сеть порожденных нейронов позволяет роботу обходить встречающиеся препятствия, делая крюк в своей траектории. Эта вторая сеть способна связывать-

*Паттернами, или паттернами активации, называют *функциональные* (не анатомические!) ансамбли нейронов, активирующиеся вместе (даже если они находятся в разных местах нервной системы) и таким образом обслуживающие определенное поведение, состояние, реакции, привычки. Благодаря функциональности (и относительной временности) таких нейронных объединений и возможной легкости их перестройки ради создания любых новых ансамблей, т. е. невероятной пластичности нервной системы, и достигается пластичность поведения, возможность обучения, любых изменений, адаптации и т. п. — Прим. перев.

ся с первой и использовать инфракрасные сенсоры для определения близости препятствия.

Дабы достичь такого результата, использовались селективные значения, которые улучшались, по мере того как робот перемещался, и фиксировались на текущих значениях, только когда препятствия оказывались непройденными.

В симуляционных моделях дополнительное поведение — стремление к источнику света — было достигнуто развитием третьей нейронной сети, взаимодействующей (интерферирующей) с двумя другими. Такие способности появились автоматически после одной ночи расчетов, тогда как Рендаллу Биру* (*Beer*) потребовалось три года, чтобы додуматься до нейроноподобных контроллеров, которые позволили таракану *Periplaneta computatatrix* демонстрировать аналогичное поведение.

Искусственный альбатрос

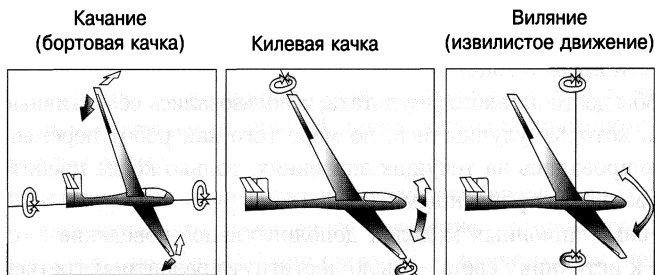
Проект *Robur*⁷⁹, он тоже ведется в лаборатории *AnimatLab*, использует такие же эволюционистские подходы. Он ставит целью развитие одного автономно летающего анимата с машущими крыльями — инспирированного преимущественно альбатросом. Размеры анимата достаточны для размещения сенсоров, электромеханического оборудования и расчетной мощности, обеспечивающей его автономию.

На данном этапе разработки никто не знает точно ни того, какой тип управления следует использовать для робота с машущими крыльями, ни какую форму крыльев следует в идеале ему придать, ни того, сколько степеней свободы им потребуется, чтобы полет робота был эффективным. Это потому, что уточнять указанные характеристики отважились предоставить самим эволюционистским процессам.

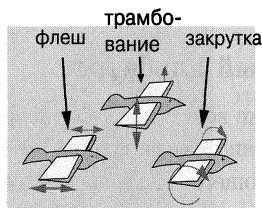
Словарь для летающей машины...

Следующие несколько определений помогут лучше понять объяснения и описания, касающиеся проекта *Robur*.

*См. статью «Искусственный таракан» в главе 8. — Прим. перев.



Бортовая и килевая качка, а также вияние касаются любого летающего устройства. Бортовая качка — это раскачивание с наклонами вправо и влево; килевая качка — раскачивание вверх-вниз; вияние — это ротация (повороты) в одной плоскости.



Ради поддержания полета летающее устройство может действовать своими подвижными крыльями (либо определенными панелями), осуществляя движения *флеш* (вперед-назад), поперечные движения крыльев — так называемое *трамбование* (вверх-вниз) и/или *закрутку* (вращательные движения).

Дабы это осуществить, был создан аэродинамический симулятор, позволяющий моделировать платформу создаваемых машущих крыльев, — с целью сравнить различные контроллеры и различные морфологии аппаратов. Тело птицы смоделировали с помощью конусов и цилиндров. Крылья состоят их трех жестких панелей, причем внутренние и внешние из этих панелей могут фланировать в соответствии с двумя степенями свободы каждая: первая может выполнять *закрутку* и *поперечные движения*, а вторая — *флеш* и

закрутку. Предполагается, что птица снабжена двумя моторами, которые осуществляют эти движения, и одним сенсором, информирующем о скорости. Эволюционистские процессы призваны выявить структуру нервной сети, координирующей движения панелей крыльев так, чтобы можно было выполнять горизонтальный полет на постоянной скорости, несмотря на случайные завихрения окружающих воздушных масс. К тому же, вместо того чтобы изолированно оптимизировать и потребление энергии, и генерируемую тягу, и производимую подъемную силу, и стабильность машины, следует найти жизнеспособный компромисс между этими различными напряжениями. Подобно тому, как это происходит в процессе естественной эволюции, искомое решение есть решение «достаточно хорошее» — *«good enough»*, как говорят англосаксы, — а вовсе не лучшее из возможных решений по каждому из значимых критериев.

Две стратегии контроля, тоже эффективнее одна другой, были выявлены благодаря этим эволюционистским процессам. Обе представляют сходство с полетом реальной птицы. Следуя первой, гомогенная сеть нейронов берет на себя расширение амплитуды взмахов крыльев, когда искусственной птице необходимо ускориться. Следуя второй, нейронный контроллер разделен на две субсети. Одна часть — это генератор взмахов крыльев, а другая приспособливает закрутку внешней панели, чтобы создать тягу, необходимую для поддержания скорости.

Таким путем были найдены контроллеры взмахов крыла, обеспечивающие полет по прямой линии. После этого эволюция освободила ресурсы для работы над дополнительными контроллерами, задействующими две панели хвоста птицы, который позволяет ей подниматься в полете, опускаться, поворачивать направо и налево.

Были использованы четыре добавочных сенсора, которые сообщают птице об углах ее бортового и килевого качания (наклона) и о ее высоте, а также о направлении той цели, к которой она стремится. Это позволило автоматически получить нейронную сеть, осуществляющую горизонтальный полет на постоянной скорости, направленный к этой цели. Для такой задачи вторая стратегия взмаха крыльев оказалась более приспособленной.

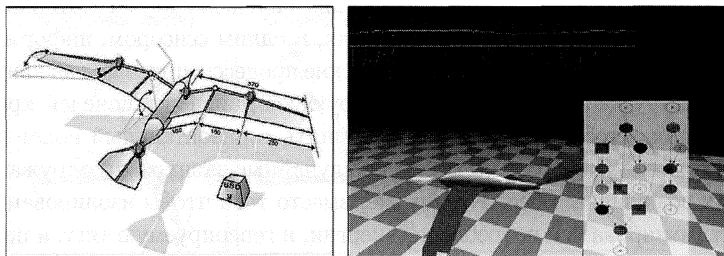


Рис. 10.7. Полет за счет взмахов крыльев. *Слева:* морфология виртуального Robur'a. В частности, крылья состоят из трех панелей, имеющих по две степени свободы каждая. Благодаря эволюции удалось научиться управлять движениями этих панелей, чтобы эффективно взмахивать крыльями. *Справа:* виртуальное окружение Robur'a и его архитектура управления; показаны две субсети нейронов, контролирующих, соответственно, генератор взмахов крыла и закрутку внешних панелей. Они позволяют анимату держаться на лету с постоянной скоростью и на постоянной высоте. (© Jean-Baptiste Mouret, AnimatLab, LIP6 & ISIR.) (См. цветную вклейку)

Хотя эволюционистские методы помогли найти способ движения крыльев, расходующий минимум энергии, птица все же будет быстро истощаться, постоянно применяя такой способ локомоции. Ведь, помимо взмахов крыльев, реальные птицы учатся использовать движение воздушных масс, например в районе склонов, тепловые потоки — и переходят от взмахов крыльев к планирующему полету. Это особенно характерно для хищных птиц. Некоторые птицы используют разницу в скорости ветра над океаном — она меньше над поверхностью более высоких волн. Так, альбатросы могут днями напролет планировать, расходуя совсем мало энергии, — почти как во время отдыха.

Контроллеры, способные осуществить такие виды поведения, тоже были разработаны благодаря искусственной эволюции в рамках проекта Robur. В частности, столь характерная траектория с использованием градиента ветра над океаном, применяемая альбатросом для экономии своей энергии, была найдена при помощи симулированного мотопланёра, который стремится эксплуатировать мини-

мальную скорость ветра, способную поддерживать его на лету в заданный промежуток времени. Эта машина снабжена тремя сериями исполнительных механизмов: рулем, предназначенным для *виляющих* движений, элеронами (подвижные края крыла), осуществляющими *бортовые качания*, и элеваторами хвоста, служащими для *килевых качаний*. Кроме того, машина имеет четыре сенсора, информирующих об углах килевых и бортовых качаний, о высоте полета устройства и об угле по отношению к ветру.

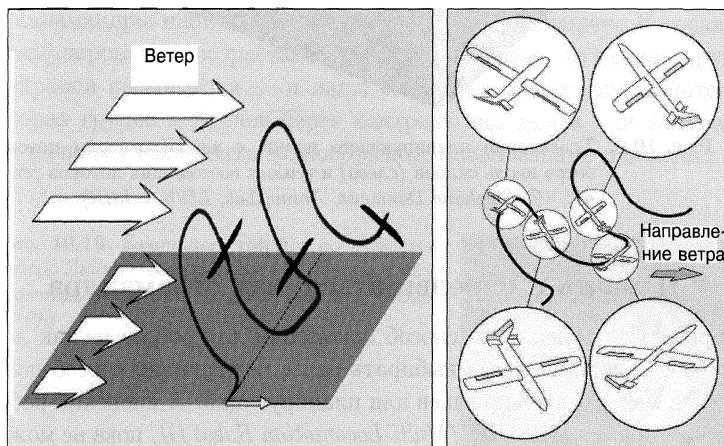


Рис. 10.8. Планирующий полет. *Слева:* динамичный планирующий полет альбатроса позволяет ему преодолевать до 6000 км за 12 дней, практически без единого взмаха крыльев. В верхней части своей траектории птица поворачивается к ветру хвостом и ныряет вниз, чтобы набрать скорость. В самом низу траектории альбатрос снова разворачивается навстречу ветру и использует накопленную энергию, чтобы вновь набрать высоту. *Справа:* траектория симулированного мотопланёра, воспроизводящего полет альбатроса. (© Renaud Barate, AnimatLab, LIP6 & ISIR)

Траектория полета «восьмерками» характерна для птиц в гористой местности, при этом они используют потоки воздуха вдоль склонов. А полет кругами опирается на восходящие тепловые токи.

Эти типы полета тоже были воссозданы с помощью искусственной эволюции симулированных планеров.

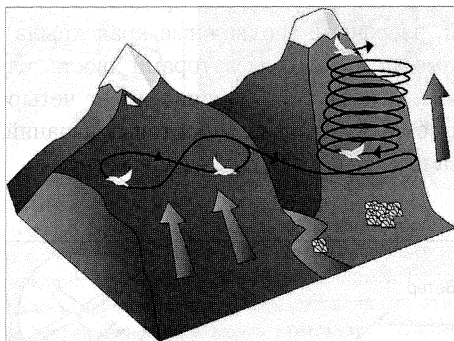


Рис. 10.9. Траектории планирующего полета с использованием потоков ветра вдоль склона (слева) и теплых восходящих потоков (справа). (© Stéphane Doncieux, AnimatLab, LIP6 & ISIR)

Плывать и передвигаться, как саламандра

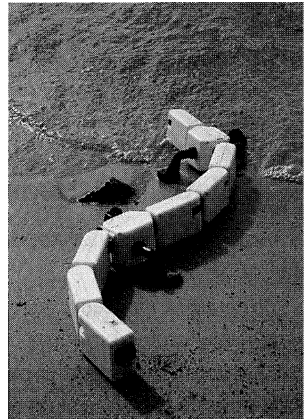
Разработать уникальный способ локомоции для робота не так легко. *Robur* пока не умеет выбирать более подходящий способ полета — за счет взмахов крыльев или планирующий. А японский робот гиббон-горилла *MLR III** (*Multi-Locomotion Robot III*) пока не может координировать три архитектуры управления, которые были присоединены одна за другой, дабы робот практиковал брахиацию, ходьбу на четырех конечностях и ходьбу на двух. Только благодаря эволюционистским методам робототехникам из группы биозаимствованных роботов Федеральной политехнической школы Лозанны (*EPFL*) и одному нейробиологу из *INSERM* в Бордо⁸⁰ удалось создать единственный контроллер, который запускает угревидное плавание — когда робот оказывается в воде, или ходьбу на четырех конечностях — если он на твердой земле. Архитектура управления робота *Salamandra robotica* основана на двух работах, посвященных особенностям нервной

*О нем рассказано в главе 9, см. статью «Обучение через подкрепление. Брахиация». — Прим. перев.

системы саламандры. Это животное действительно является идеальной моделью для изучения, ибо оно плавает, как примитивные рыбы, и передвигается, как ящерицы.

Нейробиологи показали, что у реальной саламандры в спинном мозге имеются две группы нейронов *CPG** (*центральные генераторы паттернов*), командующие, соответственно, органами, активирующими ходьбу, — с одной стороны, и всем телом в процессе волнообразного плавания — с другой. Эти группы нейронов не являются полностью независимыми, как думали до сих пор. Действительно, если стимулировать *CPG*-нейроны одной или другой группы, у саламандры наблюдают либо ходьбу, либо плавание. Но если их стимулировать с возрастающей интенсивностью, то первая группа нейронов насыщается — и лапы саламандры обездвиживаются, а вторая группа нейронов берет контроль над телом — и саламандро начинает выполнять волнообразные плавательные движения.

Рис. 10.10. *Salamandra robotica* погружается в озеро Леман. (Автор фото — A. Herzog, с разрешения *Biologically Inspired Robotics Group, EPFL*)



Salamandra robotica состоит из модулей, соединенных гибкими связками и снабжена четырьмя поворачивающимися лапами. Лебеди

* См. объяснение термина выше в этой главе (статья «Лучший способ ходьбы»). — Прим. перев.

Леманского озера могли с удивлением наблюдать, как она погружается в воду, а потом снова появляется на берегу. Ее архитектура контроля, заимствованная от связанных цепей *CPG* моторных нейронов спинного мозга реального животного, действительно была разработана с учетом нейробиологических знаний. Эта разработка позволила верифицировать тот факт, что при прогрессивном возрастании интенсивности электрического сигнала в *CPG*-нейронах, робот просто переходит с ходьбы на плавание — и наоборот. Такой способ стимуляции позволяет также изменять скорость и направление локомоции.

Это исследование прояснило способ модификации нейронных цепей земноводных животных в процессе эволюции — модификации, которая позволила им выйти из воды и адаптироваться на суше. По мнению исследователей, эта модель, возможно, приложима ко всем позвоночным тетраподам*, вплоть до человека. Она, кроме того, могла бы помочь медикам и неврологам лучше понять двигательные проблемы некоторых пациентов.

Коэволюция

Парадокс Черной королевы

Алиса: «Но, Черная королева, мы бежим быстро, а пейзаж вокруг нас не меняется!»

Черная королева[†]: «Ты должна бежать что есть мочи, как раз для того, чтобы оставаться на месте».

Алиса и Королева перемещаются с той же скоростью, что и пейзаж вокруг них⁸¹. Таков принцип к которому приводит коэволюция,

*С четырьмя конечностями. — *Прим. перев.*

[†]В оригинале «Красная королева». Вот комментарий по этому поводу из Википедии: Кэррол называл чёрные фигуры «красными», так как в шахматных наборах тех лет цвет фигур был действительно близок к красному (например, Стаунтоновские фигуры). Переводчики всегда переводят *Red Queen* как Черная королева и т. д., исходя из общепринятого названия шахматных фигур. — *Прим. перев.*

повергая живые системы в бесконечную гонку вооружений. Когда одни придумывают новую экипировку или поведение, чтобы приумножить свои возможности в ущерб другим, эти последние изобретают что-то еще, чтобы этому противодействовать, и так далее. Парадокс состоит в том, что сложность этих видов поведения или других приспособлений, похоже, возрастает по ходу эволюции, но не обязательно связана с улучшением адаптации в своем непосредственном окружении.

Появление очень разнообразных видов поведения можно было бы объяснить также тем, что живые системы непрерывно подвергаются *сопоставлению* друг с другом со стороны их динамического окружения. Окружения, населенного такими же живыми созданиями, преследующими те же цели выживания. Было предпринято немало симуляций процессов козволюции, в которых многие популяции аниматов имели разные цели.

Группа робототехников Лаборатории интеллектуальных систем *EPFL*⁸² таким именно образом изучала отношения хищник–жертва между роботами — с участием маленьких роботов на колесах. Хищник, в данном случае, имеет один визуальный сенсор для распознавания жертвы на расстоянии, а жертва слепа, но зато может перемещаться вдвое быстрее хищника. Оба они снабжены инфракрасными сенсорами, чтобы определять приближающуюся стену или другого робота. Селективная значимость хищника оценивается за счет его способности поймать жертву, а селективная значимость жертвы — по умению убежать от хищника.

Две популяции по 100 индивидов развивались на протяжении 100 поколений (генераций) и показали, что козволюция привела к ограничениям в достижениях двух групп — напоминание о Черной королеве. Действительно, конфронтация двух соперников препятствовала их эволюции: хищники должны были все лучше ловить добычу, а она все успешнее убегать от хищников. Зато такая тренировочная козволюция через несколько поколений помогла появиться множеству различных стратегий. Например, хищники сначала ловили добычу преследуя ее, а затем сменили тактику на поджидание жертвы, устраивая засаду в одном месте, чтобы наброситься на нее,

когда она приблизится. Аналогично жертвы сначала замирали где-нибудь у стены, спасаясь от хищников, а при их появлении принимались удирать, а потом стали быстро и немного хаотично перемещаться, дабы траектории их перемещения были не очень предсказуемыми. Каждая из этих стратегий появилась неожиданно, когда противник достаточно эволюционировал, чтобы сдать предыдущую привычную, но малоэффективную стратегию. Некоторые стратегии могут вновь возвращаться в ходе эволюции.

Выводы из этой работы таковы. В целом с течением времени более устойчивыми оказываются скорее те индивиды, которые развивают простые и легко модифицируемые стратегии, нежели те, что развивают стратегии сложные, подверженные влиянию множества различных обстоятельств. Для аниматов именно возможность сделать быстрый выбор из репертуара простых стратегий будет более адаптивной, чем разработка единственной, но очень мудреной стратегии. Этот вывод перекликается с теми, что были сформулированы выше, касательно группового разума...

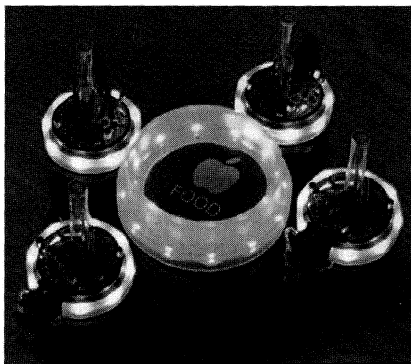
Козволюционировать, ЧТОБЫ общаться

Та же группа в сотрудничестве с Лореном Келлером — биологом из Департамента экологии и эволюции Лозанны, кроме того, исследовала некоторые значимые факторы эволюции коммуникации в сообществах насекомых. Исследователи вначале осуществили эволюцию, под различными селективными воздействиями, десяти колоний роботов-симулятов на протяжении 500 поколений, а затем разработчики перезагрузили (перенесли) соответствующие архитектуры контроля для управления истинными роботами — *s-bots*, имевшими те же характеристики, что и роботы-симуляты.

Роботы помещены в пространство, где расположены запасы «съедобной» и «отравленной» пищи, они окружены розовым или красным светом, соответственно. Роботы *s-боты* снабжены визуальными сенсорами, способными отличить природу двух типов ресурсов. Роботы могут испускать синий свет, а также воспринимать синий свет, излучаемый другим роботом. Их архитектура контроля основана всего на трех десятках нейронов, чьи параметры запускаются слу-

чайным образом. Эволюционистские процессы призваны уточнить способ перемещения роботов, способ применения испускаемого ими синего света и способ «интерпретации» ими света, испускаемого соплеменниками, — таким образом, чтобы они выживали максимально продолжительное время. Коммуникация между роботами (она не программировалась заранее) могла бы осуществляться за счет испускания синего света для сигнализирования о данном ресурсе пищи. Другие роботы могли бы интерпретировать эти сигналы либо как сигнал к приближению (если запасы пищи съедобны), либо как сигнал к избеганию (если отравлены). Проблема в том, что доступ к съедобным запасам ограничен, поскольку роботу необходимо находиться в прямом контакте с этой зоной, чтобы заполучить пищу. К тому же робот совсем не «заинтересован» сигнализировать о качестве запасов пищи в данном светящемся круге.

Рис. 10.11. Роботы *s-боты* (*s-bots*) обнаружили источник съедобной пищи. (© Dario Floreano, Федеральная политехническая школа Лозанны). (См. цветную вклейку)



Были испытаны два вида колоний. Одна включала роботов, имеющих близкие генотипы — с «родственными связями», а другая состояла из роботов с разными генотипами — «неродственными». И были применены две формы селекции. Одна в каждом поколении сохраняла индивидов, имевших лучшее время выживания в колонии (индивидуальный критерий). А другая в каждой генерации сохраняла роботов той колонии, которая демонстрировала лучшие показатели выживания (групповой критерий). Все роботы начинали с поведения совершенно случайного, и те из них, что избежали

максимальное число отравленных источников пищи, были допущены к воспроизводству. Анализируя результаты 500 поколений, исследователи с удивлением вынуждены были констатировать, что, несмотря на простоту архитектуры управления *s*-ботов, они развили разнообразные способы коммуникации. На самом деле, когда роботы породнились и селекция вышла на уровень группы, коммуникация развивается очень быстро и применяется в целях кооперации: определенные индивиды специализируются на испускании сигналов, сообщающих о близости пищи, а другие сигнализируют об отраве. Выживаемость колонии при этом значительно улучшается. Однако если роботы не породнились или если селекция велась по индивидуальному критерию, коммуникация развивается очень мало. Когда происходит индивидуальная селекция, она может привести к падению глобальных результатов: отдельные индивиды могут лишь развить обманные сигналы, уводящие некоторых из их соплеменников подалеже от источников пищи — чтобы потребить самим побольше и помешать воспроизводству голодных соперников. Это очень примитивная форма того, что называют *маккиавеллиевским умом*⁸³...

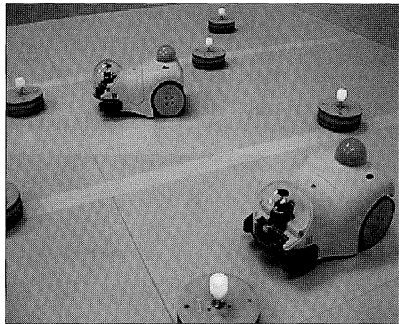
Подобно эксперименту с обучением Говорящих Голов, роботы этой колонии приобрели дополнительную информацию под влиянием «социальной» структуры и способа селекции, индивидуальной или групповой, а также коммуникации — конечно, очень примитивной. Лорен Кёллер, чья специальность — изучение муравьев, видит здесь немало аналогий с поведением, наблюдаемым у общественных насекомых. Действительно, кооперативная коммуникация, способствующая передаче похожего генотипа родственным роботам, напомнила ему открытия, сделанные при изучении муравьев *Formica exsecta*. Они поддерживают «нормальные» отношения с теми сородичами, которые им ближе генетически, и исключают более далеких по родству.

Козволюционировать, ЧТОБЫ обучаться

Коллективный эксперимент с маленькими роботами *Cyber Rodent* Института науки и технологии в Окинаве, Япония⁸⁴, немного похож. Эти роботы наделены ненаправленным (всенаправленным) зрением, инфракрасными сенсорами для различения препятствий и соплеменников,

а также могут излучать три типа световых сигналов для вероятной коммуникации. Их глобальная цель — «выжить»: для этого они могут подзаряжаться от батарей, рассеянных в их окружении. Кроме того, они должны «воспроизводиться» за счет обмена своими хромосомами с другими роботами *через* инфракрасный порт. Батареи имеют разные цвета и представляют собой различные типы ресурсов — неприятные (аверсивные) и отпугивающие*, о чем роботы вначале не знают.

Рис. 10.12. Роботы *Cyber Rodent* выживают и воспроизводятся в пространстве лаборатории, где размещены многочисленные энергетические ресурсы. (© Kenji Doya, Okinawa Institute of Science and Technology)



Данная работа интересна тем, что вместе со сменой поколений роботов должны появиться не какие-то определенные типы поведения, а *методы обучения* этому поведению. По воле эволюционных процессов это могут быть различные параметры обучения: естественного или с подкреплением, использование одного или сразу нескольких видов обучения, использование памяти или стихийный поиск новых элементов. Эти исследования демонстрируют, что искусственная эволюция может быть полезна для робототехников не только при разработке концепции архитектуры управления, но в деле поиска оптимального способа обучения роботов.

Козволюционировать И обучаться

Европейский проект *Swarm-bot* Федеральной политехнической школы Лозанны⁸⁵ проходит дополнительный этап отработки (усложнения)

*В оригинале: *aversives et répulsives* — Прим. перев.

поставленных задач. Тридцать маленьких роботов *s*-ботов (*s-bots*) снабжены захватами, которые позволяют им цепляться друг за друга, а также небольшими светильниками, чтобы общаться с наиболее близкими роботами — как у тех *s*-ботов, которые перед этим вместе коэволюционировали. Благодаря чередованию эволюционистских методов и методов обучения *s*-боты приобрели способность к автономному самоуправлению и могли соединять в одно целое различные приемы: толкать тяжелый объект, обходя препятствия, собирать предметы на арене или даже преодолевать небольшой ров. Все эти действия не смог бы выполнить одиночный робот. Помимо таких зрелищных достижений коллективных роботов, основная цель этого опыта — выяснить влияние размера группы на успех выполнения различных задач.

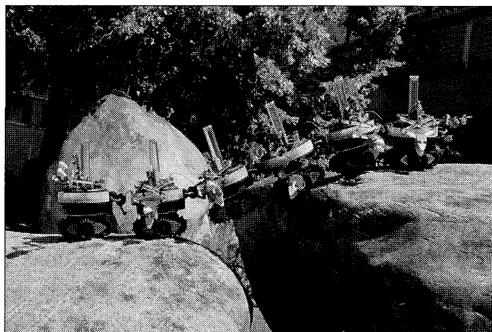


Рис. 10.13. Несколько роботов — *s*-ботов, зацепившись друг за друга, коллективно преодолевают препятствие, которое не смог бы преодолеть одиночный робот. (© *Francesco Mondada*, проект *Swarm-bot*, Федеральная политехническая школа Лозанны.) (См. цветную вклейку)

Коэволюция морфологии И системы управления

Эволюционистские методы способны помочь в разработке хороших архитектур управления для роботов с определенной структурой тела. Робототехники надеются, что эволюционистским процессам можно

будет также подвергать концепцию морфологии и одновременно связанную с ней архитектуру контроля.

Американский исследователь Карл Симс (*Sims*) уже несколько лет назад осуществил впечатляющую работу в этом направлении. Он разработал, в виде симулята, разом облик и систему контроля невероятных (маловероятных) созданий. Эти создания, построенные из случайных комбинаций параллелепипедов разных размеров, различавшихся по количеству параллелепипедов и их расположению, помещали в водную среду или на сушу. В соответствующей среде они доказывали свои способности плавать, ходить или прыгать — иногда в очень комичной манере. Естественно, так же, как слон и муравей по-разному управляют своим телом при ходьбе, определенная система контроля (контроллер) эволюционно связана с определенной морфологией.

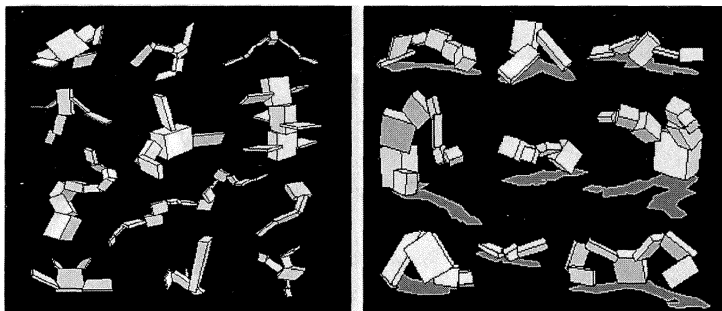


Рис. 10.14. Несколько маловероятных созданий эволюционировали, приспособляясь плавать (слева) и ходить (справа). (По материалам Карла Симса)

В рамках проекта *Golem* (*Genetically Organized Lifelike Electro Mechanics*) Университета им. Луи Брандейса (*Brandeis*)⁸⁶ преодолен дополнительный этап, позволяющий перейти от симулятов к реальности. Счет ведется по одному критерию селективной значимости, определенному изначально. Соответствующие создания должны развить одновременно свою морфологию, а также структуру и параметры своей архитектуры контроля. Таким образом, чтобы произвести машины, способные продвигаться вперед по земле,

процесс искусственной селекции вели от симуляции, как это делал предыдущий исследователь. В соответствии с этим процессом генотип наиболее успешного индивида служит быстрым прототипом для машины. Это нечто вроде фотокопии в трех измерениях, расшифровывающей и воспроизводящей соответствующую информацию слой за слоем — фенотип, отобранный искусственной эволюцией.

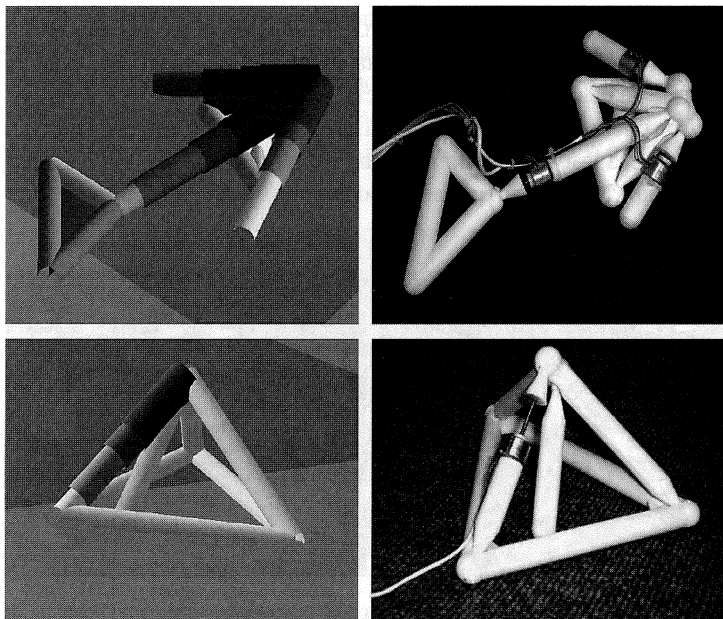


Рис. 10.15. Слева: симулированные формы, созданные искусственной эволюцией. Справа: реальные роботы, созданные автоматически по плану предыдущих форм. (© Jordan Pollack, Brandeis University)

Исследователи начали осуществлять эту роботическую аутоконструкцию по возможности максимально простым способом. Они предписали программе создать конструкции из элементов в форме палочек (стержней) разного размера и с разными сочленениями, а также исполнительные механизмы движения в этих сочленениях, дабы анимировать полученные виртуальные создания. Была дана

инструкция перемещаться на суше по прямой линии. Начиная с популяции в 200 индивидов понадобилось 600 поколений для появления индивидов, умеющих перемещаться правильно.

Несмотря на простоту заданной задачи и возможной морфологии, авторы были удивлены, обнаружив разнообразие полученных решений поставленной проблемы, притом простых и эффективных. Чаще всего появлялись симметричные структуры, хотя начальная инструкция этого не требовала. Другие явленные решения были негнушимися конструкциями с изменяющейся длиной их стержней, и такие изменения не влияли на их подвижность.

Эти интересные результаты не должны, однако, затенять трудности такой затеи. С одной стороны, концепция робота, развиваясь в виртуальном пространстве, не всегда идеально адаптирована к реальному миру, просто потому, что невозможно смоделировать все аспекты этого мира. С другой стороны, нет уверенности в том, что концепты, алгоритмы и машины, полученные в результате таких поисков, окажутся годными для решения более сложных проблем, нежели те, что они выполняют сегодня. К тому же, чтобы преодолеть имеющиеся ограничения, исследователи из Университета им. Луи Брандейса удачно провели кампанию мобилизации добровольцев. Частные лица должны были приютить на своих персональных компьютерах паралельные расчеты — нашлось 30 000 волонтеров. Исследователи установили срок этой операции, объяснив своим добровольным партнерам, что используемые методы отнюдь не благоприятствуют расширению поля возможностей*. Теперь исследователи ориентировали свою работу на концепцию новых эволюционистских теорий и механизмов в надежде преодолеть «барьер сложности», с которым они сейчас столкнулись.

Расскажем еще об одном опыте, проведенном той же группой. Опыте, тоже открывающем большие перспективы в робототехнике, поскольку он касается поведенческой реорганизации в случае повреждения или «ранения». Один из их роботов, похожий на морскую звезду с четырьмя лучами, потеряв одну из своих рук (лучей), сумел

*Здесь, видимо, имеется в виду ограничение возможностей самого пользователя при занятом сторонними расчетами компьютере. — *Прим. перев.*

реорганизовать свой способ передвижения. Стремясь осуществить это, он начал опытным путем изобретать (представлять себе) «внутреннюю модель себя самого», ибо «не знал», какую форму имеет. Он соотносил свои «ощущения» с различными возможными формами и разработал несколько моделей себя самого, затем определил те из них, которые казались ему наиболее правдоподобными. В таком случае он может использовать эту модель для генерирования новых видов поведения. Если один из его конституциональных элементов не работает, он «придумывает» другие модели, исходя из той модели, которая до настоящего момента работала хорошо, но используя то, что более всего соответствует новой морфологии, и стараясь выполнить свою миссию, несмотря ни на что.

Таким образом, исследования, направленные на расширение автономии искусственных систем за счет биомиметического заимствования, успешно ведутся в лабораториях по всему миру. Чтобы восполнить некоторое отставание в этой области, Евросоюз недавно ввел новую программу поддержки исследований в сфере «Технологии будущего и наступающие» (*FET*), рассчитанную до 2020 года. Отныне она, в частности, поощряет работы, касающиеся роботов, способных к аутоконфигурации (*self-configuring*), самооптимизации (*self-optimising*), самозащите (*self-protecting*) и самовосстановлению (*self-healing*).

ЧАСТЬ III

Гибриды

ГЛАВА II

ОТ ПРОТЕЗОВ К КИБЕРПРОТЕЗАМ

«Есть многое на свете, друг Горацио, что не подвластно нашим мудрецам».

Вильям Шекспир, «Гамлет»*

Древности

Самые древние следы человеческой культуры свидетельствуют, что человек во все времена искал способы замены органов или конечностей — поврежденных или отсутствующих.

В Ригведе — священных текстах брахманизма, датируемых 3800–2700 годами до нашей эры, написано, что агрессивная воительница Виспала была ранена во время битвы и ее нога была ампутирована «так сурово, что остался лишь обрубок крыла дикой птицы». Однако Ашвины — небесные близнецы и целители, сделали ей железную ногу, чтобы она смогла принять участие в следующем сражении. Аналогично, 2400 лет тому назад Геродот рассказывал, что прорицатель Хесистрат (*Hégésistrate d'Elée*), будучи закован спартамцами в кандалы, захватил некий режущий предмет и тайком пронес его в тюрьму. Там он перерезал себе «часть ступни, перед пальцами, чтобы можно было вытащить из пут остаток ноги». Потом он бежал из тюрьмы, проделав лаз в крепостной стене и смастерил себе деревянную ступню. История умалчивает, как Хесистрат чудесным образом заживил рану после своей ампутации.

*Перевод Б.Л. Пастернака.

Протезы такого типа, действительно, были найдены. Их возраст насчитывает более 2200 лет. Например, у одной египетской мумии обнаружена искусственная подвижная кисть, соединенная с предплечьем, искусственная нога найдена при раскопках в Казахстане, а зубные протезы, импланты и искусственные челюсти находили по всему Средиземноморью. А вот искусственные глаза, столь совершенно вылепленные и расписанные древними египтянами, видимо, служили только для украшения статуй.

Пассивные протезы

В последние несколько веков находки истории протезов продолжаются. В XVI веке во время своего пребывания в Германии датский астроном Тихо Браге* повздорил со своим соотечественником в споре о Пифагоре. Эта ссора окончилась дуэлью, и у Тихо Браге оказалась отсеченной часть носа. Он сделал себе носовую накладку из золота и серебра, по-видимому, она крепилась просто на воске.

В эту эпоху известны и другие протезы, более сложные. Германский рыцарь Гёц фон Берлихинген (*Berlichingen*) потерял кисть руки при осаде Ландсхута (*Landshut*) в 1504 году. Один кузнец в окрестностях его замка Ягстхаузен (*Jagsthausen*) в Баден-Вюртемберге смастерил ему руку с четырьмя подвижными пальцами. Это устройство сохранилось до наших дней, оно представлено в музее замка. Несколькоими годами позже швейцарский часовщик Шарль Кузин (*Cusin*) изготовил подвижную искусственную руку, ладонь которой могла сжиматься и разжиматься.

В то же самое время мастер в таких делах и знаменитый французский хирург Амбруаз Парэ† (*Ambroise Paré*) оказывал подобную помощь. Тем более что с применением новых военных стратегий

*Тихо Браге (дат. *Tyge Ottesen Brahe* (инф.), лат. *Tycho Brahe*; 14 декабря 1546, Кнудstrup, Дания (ныне на территории Швеции) — 24 октября 1601, Прага) — датский астроном, астролог и алхимик эпохи Возрождения. — *Википедия*.

†Амбруаз Парэ (фр. *Ambroise Paré*) (ок. 1510–1590) — французский хирург, считающийся одним из отцов современной медицины. — *Википедия*.

и техники — тогда появились передвижные пушки и легкая артиллерия — после сражений оставалось все больше раненых. Именно Парэ придумал накладывать на поврежденные артерии лигатуру, чтобы рана на култе от ампутированной конечности могла зарубцеваться.



Рис. 11.1. Слева: астроном Тихо Браге и его искусственный нос. Справа: Гёц фон Берлихинген (*Berlichingen*) со своей протезной рукой

Амбруаз Парэ специализировался на подвижных протезах. Он сконструировал руку из дерева, сгибающуюся в локте благодаря пружине, а затем — кисть руки с подвижными пальцами. Кроме того, он придумал модели ног: «ногу для бедняков» — жесткий костыль, и «ногу для богатых» — сгибающуюся в колене и голеностопе (щиколотке) и имевшую более естественную форму. Отметим также, что именно Амбруаз Парэ изобрел первые протезы глазных яблок — тяжелые шары из покрытого эмалью золота или серебра. Только столетие спустя их заменили более легкие протезы из стекла, секрет изготовления которого долгое время тщательно оберегался венецианцами.

В XVII веке параллельно конструированию «живых автоматов» были значительно усовершенствованы и механические протезы. Они стали удобнее в плане выполнения своих функций и выглядели более эстетично. Принцип этих протезов, по сути, используется и в наши

дни, изменились только материалы, из которых изготавливают механические протезы.

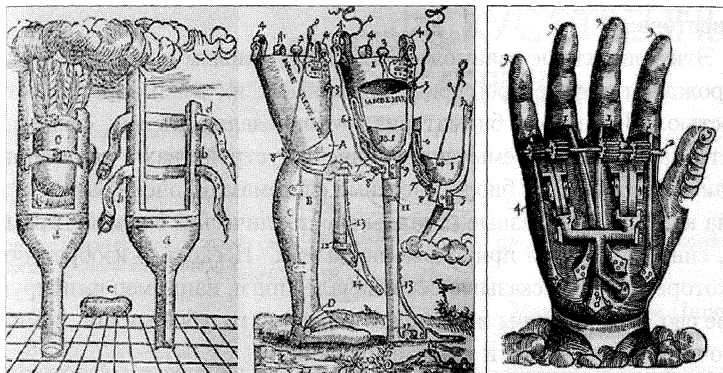


Рис. 11.2. Протезы конструкции Амбруаза Парэ. Слева: «нога для бедняков» и «нога для богатых». Справа: подвижная рука. (Ambroise Paré «Десять книг по хирургии», Париж, 1564)

Эра киберпротезов

В конце XX века появились другие хирургические протезы — эндопротезы, заменяющие внутренние органы: кардиостимуляторы, сосудистые стенты, которые расширяют просвет сосудов, искусственные хрящи и жесткие структуры для коленного сустава и бедренной кости.

Недавний прогресс в области электроники способствовал развитию концепции так называемых «интеллектуальных» протезов и эндопротезов, а также *киберпротезов*. Интеллектуальные протезы существенно отличаются от описанных выше «пассивных» протезов, поскольку они управляются микропроцессором, непосредственно связанным с нервной системой или мышцами их носителя. Киберпротезы представляют собой электронные чипы, вводимые в тело пациента, но не связанные при этом с искусственным органом. Они

используются либо для того, чтобы отправлять моторные (двигательные) команды органу или природной конечности носителя, либо для обработки информации, полученной естественными сенсорными рецепторами.

Эти контактные взаимодействия между живым и искусственным порождают другие проблемы, связанные с их взаимной совместимостью. Инженерия биоматериалов (определяемых как «неживые материалы, используемые в медицинских устройствах и призванные взаимодействовать с биологическими системами») очень разрослась. Она комбинирует разные металлы и металлические сплавы, керамику, синтетические и природные полимеры. Несколько изобретений, о которых уже рассказывалось в начале книги, например имитирующие свойства паутины и клеящего вещества голубой мидии, помимо прочего применяются и в протезировании.

Далее мы приведем несколько примеров киберпротезов в качестве искусственных систем, интегрированных в живую систему, — даже если они еще не уподобили своих обладателей бионическим героям вымышленных историй. В любом случае гибридизации касаются только живых систем. И, на самом деле, впервые в истории развития человеческой мысли экспериментаторы пытаются сделать нечто противоположное — интегрировать живое в искусственное, создать своего рода бионических роботов, о которых пойдет речь в следующей главе.

ГЛАВА 12

ИСКУССТВЕННЫЕ ГИБРИДЫ

*Если мы руководствуемся природой, мы никогда не
сбьемся с пути.*

Марк Тиллиус Цицерон

Некоторые материалы, структуры и приемы, придуманные и взятые на вооружение Природой за три с половиной миллиарда лет эволюции, пока не удастся скопировать. На самом деле мы не можем пока понять, как воспроизвести их свойства или, по крайней мере сегодня, не располагаем инструментами, позволяющими осуществить это. Итак, есть большое искушение напрямую возместить орган (или часть органа), ответственный за рассматриваемые свойства в недрах данной живой системы, и ввести его в искусственный ансамбль, который будет использовать эти свойства. Естественно, следует довести такой «привой» до полноценного функционирования в составе гибридной системы, что отнюдь не так просто, но и не безнадежно. Эту логику уже не раз использовали различными способами, и неудивительно, что она начала распространяться — связанные с ней теоретические выводы и практические приложения настолько многообещающи.

Гибридизация с природными сенсорами

Происходящий из Китая тутовый шелкопряд был одомашнен уже за 2600 лет до нашей эры. Эго личинки питаются, как следует из его названия, листьями тутового дерева и в возрасте между 30 и

40 днями они становятся в 25 раз больше и в 12 000 раз тяжелее, чем при рождении. В конце периода своего роста они прекращают питаться, и у них активизируются выделительные (слюнные) железы, расположенные позади челюстей. Каждая из этих желез секретирует одно волоконец непрерывной шелковой нити, которая образует укрывающий кокон будущей куколки. Для бабочки, появляющейся из такого кокона, характерен тяжелый полет, поскольку это насекомое обладает значительной массой при маленьких крылышках. Бабочка живет всего несколько дней, в течение которых она активно стремится оставить потомство. Ради этого девственная самка испускает феромоны, называемые «бомбикол» (*bombycol*). Достаточно присутствия в воздухе одной молекулы феромона, чтобы самец тутового шелкопряда уловил их своими обонятельными рецепторами, расположенными на антеннах, и начал определять местонахождение самки, стремясь приблизиться к ней. Было показано, что самец реагирует даже на очень слабую концентрацию бомбикола в воздухе — всего 200 молекул на кубический метр — и может почуять самку на расстоянии 10 километров!

Задача сконструировать детектор запахов с такой невероятной чувствительностью решается уже долгое время и пока остается недоступной человеческим технологиям. Японские исследователи, пытаясь решить эту задачу, изъяли (отделили) антенны самца шелкопряда и поддерживают их функционально, присоединив окончания антенн к двум стеклянным капиллярам, заполненным физиологическим раствором — он временно передохраняет изъятые органы от обезвоживания. Затем они присоединили эти антенны к электронному устройству, посредством медных электродов, погруженных в капилляры. Всю эту конструкцию они водрузили в передней части маленького робота на колесиках, чьи размеры приближались к размерам бабочки тутового шелкопряда.

Таким образом, теперь тот нервный импульс, который посылают антенны при восприятии запахов, можно переводить в «электроантеннограмму», что позволяет наблюдать развитие во времени разницы потенциалов между двумя окончаниями каждой антенны. Когда разница потенциалов превышает определенный порог, это означает, что определено присутствие в воздухе феромона *bombycol*. Эта

информация передается через компьютер колесам робота. В результате очень простая программа позволяет роботу демонстрировать химотаксическое* поведение — следовать за облаком феромонов, которые экспериментатор разбрызгивает из пульверизатора. Программа основана на следующих инструкциях:

- если правая (левая) антенна определяет наличие феромона, тогда вращать левое (правое) колесо таким образом, чтобы робот повернул направо (налево);
- если обе антенны распознают наличие бомбикола, оба колеса должны вращаться так, чтобы робот двигался прямо вперед;
- если никакая антенна не распознает присутствие бомбикола в воздухе, оба колеса должны остановиться и робот не должен никуда выдвигаться.

Сходство поведения, демонстрируемого роботом и живым насекомым, позволяет лучше понять причину странной зигзагообразной траектории полета, характерной для самца тутового шелкопряда.

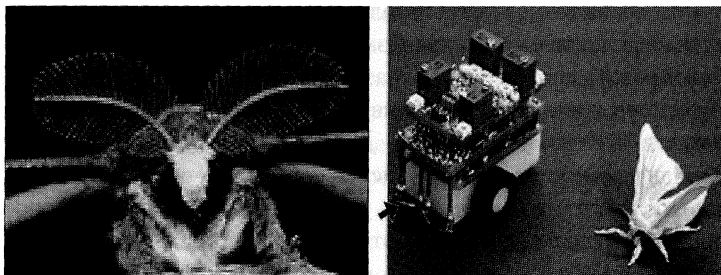


Рис. 12.1. Слева: антенны самца бабочки тутового шелкопряда. Справа: робот, экипированный двумя изъятыми антеннами шелкопряда. (© Ryohei Kanzaki, University of Tokyo)

Современные технологии позволяют сохранять в рабочем состоянии восприимчивые антенны тутового шелкопряда не более одного

*Объяснение термина см. в главе 8, статья «Искусственный таракан», рубрика «Архитектура поглощения». — Прим. перев.

дня, и притом они определяют источник запаха на расстоянии лишь в несколько сантиметров. Тем не менее будущее такого рода исследований кажется многообещающим: с учетом всех природных сенсорных устройств, которые явно бросают вызов этой технологии. В то же время подобные устройства создают определенные этические проблемы.

Гибридизация с природными эффекторами

Другой вызов современным технологиям, который они пока одолеть не могут, касается производства таких эффекторов*, которые были бы аналогичны живой мышечной ткани по своей пластичности и способности к «восстановлению». К тому же энергетическая производительность мышечной ткани замечательна: на работу объемом в 1000 Дж (джоулей), она расходует всего 1 г потребленной глюкозы. Наконец, она потребляет легко обновляемые запасы энергии и производит отходы, перерабатываемые окружающей средой.

Для оценки возможности использования подобного материала в качестве исполнительного механизма у роботов, агентство *DARPA*⁸⁷ субсидировало изготовление акватического робота, снабженного хвостом из синтетического эластомера, приводимого в действие парой мускулов, взятых у лягушки. Движения хвоста осуществляются этими двумя мышцами-антагонистами, а сами мышцы провоцируются электрическими импульсами, управляемыми микропроцессором. Для того чтобы поддерживать этот натуральный эксплант (мышцы лягушки) в рабочем состоянии, робота погружают в физиологический раствор с добавлением антибиотиков и фунгицидных средств, а также глюкозы, которая снабжает мышцы необходимой им энергией. Таким образом удается поддерживать изъятые мышцы на протяжении 42 часов. И в общей сумме лишь 4 часа робот может выполнять простые маневры, такие как: тронуться с места,

*Эффектор (лат. *effector* — совершающий действие) — в физиологии — орган, деятельность которого изменяется в результате управляющего воздействия центральной нервной системы, ее определенного отдела или определенного рефлекса. — *Энциклопедический словарь медицинских терминов.*

остановиться, поворачивать или плыть по прямой. При этом он перемещается со скоростью до одной трети своей длины в секунду.

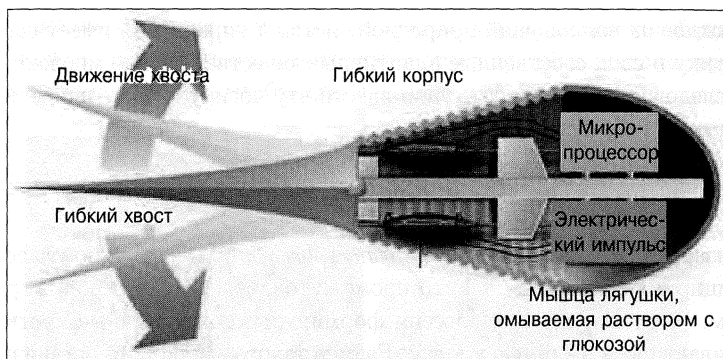


Рис. 12.2. Робот-рыба, управляемый мышцами лягушки

Хотя первые результаты внушают оптимизм, здесь тоже остается немало проблем, которые следовало бы решить, прежде чем надеяться на реальное практическое применение этой разработки. В частности, необходимо найти способ поддержания более длительных и частых мышечных сокращений в экспланте. Следовало бы также иметь возможность модулировать возбуждение мышечных волокон — активизировать большее или меньшее их число в соответствии с выполняемым движением, вместо того чтобы помещать всю мышцу в единое электрическое поле, как было сделано здесь.

Гибридизация с природными архитектурами управления

Природа изобрела множество способов, позволяющих живым существам реагировать на изменения их внешней и внутренней среды. Скажем, одноклеточные системы используют сенсоры и исполнительные

механизмы на молекулярном уровне, которые взаимодействуют химическим или механическим путем. Более развитые животные наделены различными органами и специализированными тканями вроде нервной системы, продуцирующей сигналы электрической природы. Каждое из воплощений природной системы управления имеет свою логику и свои собственные адаптивные качества. Целью множества исследовательских работ стало внести эту логику и адаптивные качества в гибридные системы.

Единственная клетка

Физариум полицефалум (*Physarum polycephalum*) — трудно классифицируемый организм: нечто промежуточное между амебой и грибом. Этот вид желтой плесени формирует множественные клетки, сливающиеся в единую клетку. Размер такого аморфного организма может варьировать от нескольких десятков микрон до нескольких метров. Его обмен с окружающей средой осуществляется посредством эндоскелета, состоящего из очень плотной сети микроскопических трубочек, заполненных цитоплазмой. Благодаря транспортировке веществ, организованной в этой сети, физариум способен воспринимать и приходить в движение — сообразно полученной стимуляции. Он может уловить запах бактерий и приблизиться к ним, чтобы поглотить их. Может уловить источник света, и тогда физариум норовит удалиться, убежать от него. Это последнее свойство стремятся использовать для управления роботом.

Одна группа японских и английских исследователей предприняла опыление экстрактом физариума шести расположенных по кругу областей подставки, покрытой агаром — желеобразным веществом, часто используемым в качестве основы микробиологической культуры. Затем культура физариума начала расти, и шесть областей объединились — пререстроились в единую клетку и сформировали сеть в форме звезды с шестью лучами. Когда пучок какого-нибудь источника света проецировался на окончание одной из ветвей этой звезды, такая стимуляция заставляла колебаться цитоплазму внутри трубочек, находящихся в данном конкретном месте цепи. Затем эту цепь присоединили к роботу с шестью ногами, снабженному шестью

детекторами света — каждый контактировал с одним из окончаний ответвления (луча звезды) органической цепи. В соответствии с тем, какой сенсор стимулировался колебаниями цитоплазмы, активизировалась одна из ног робота. Таким образом, если сенсоры робота улавливали источник света в определенном направлении, колебания физариума переводились в моторные паттерны, заставлявшие ноги робота двигаться так, чтобы удаляться от источника света.

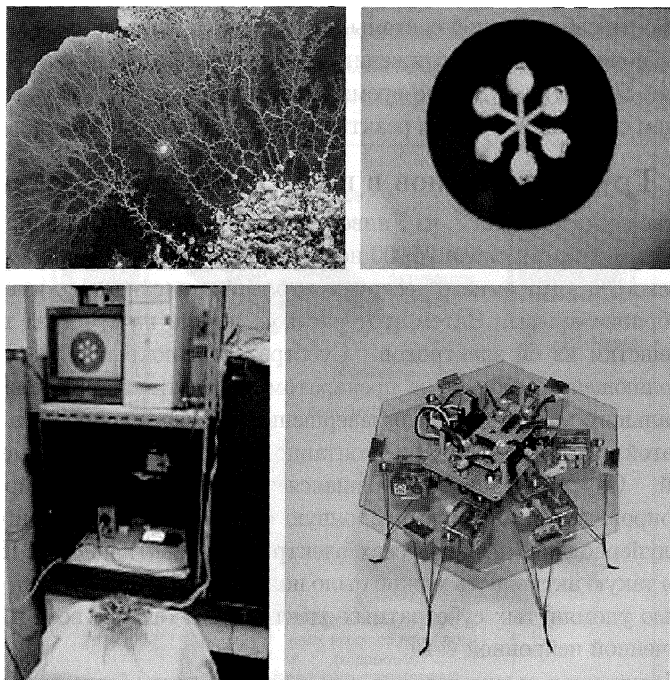


Рис. 12.3. Робот, управляемый... плесенью *Вверху слева*: часть организма физариум полицефалум (*Physarum polycephalum*), создающего сеть пронизывающих его трубочек. *Вверху справа*: цепь физариума в виде звезды. *Внизу слева*: устройство, позволяющее управлять роботом гексаподом (шестиногим) посредством клетки *Physarum polycephalum*. *Внизу справа*: сам робот гексапод. (© Soichiro Tsuda, Kobe University.) (См. цветную вклейку)

Возможные выгоды такого рода конструкции многочисленны и, вероятно, породят другие исследования и практические приложения. В первую очередь преимущества состоят в том, что соответствующая структура контроля способна к самоорганизации. На основе шести отдельных первоначальных источников обсеменения, она создала единый организм. И эта структура будет способна самовосстановиться, даже если, например, одна из ветвей организма окажется отрезанной или разрушенной. Кроме того, энергетическая стоимость работы такой системы весьма небольшая: система может функционировать на протяжении многих дней без какого-либо питания. Наконец, ее долгое время можно поддерживать в сухом — спящем состоянии, а потом реактивировать с помощью увлажнения.

Группа нейронов в виде отдельной культуры

Другие исследователи⁸⁸, из Университета Флориды, изготовили раствор, содержащий около 25 000 нейронов, полученных за счет механического и химического деструктурирования части коры, изъятой у эмбриона крысы. Затем этот раствор налили на субстрат в виде решетки из 64 электродов. Субстрат был покрыт мембраной, позволяющей наблюдать за препаратом абсолютно без рисков бактериального заражения. По завершении 3–5 дней нейроны в недрах этой культуры начинали спонтанно устанавливать связи между собой. Спустя 10 дней развившаяся таким путем сеть нейронов генерировала нормальную нейронную активность, выражавшуюся в полупериодических всплесках электрической активности. После этого такую активность можно было получать и анализировать с помощью упомянутых субстратных электродов в течение всей жизни полученной нейронной сети.

Полученная рудиментарная сеть нейронов затем была присоединена к очень сложной искусственной системе — симулятору полета самолета *F-22 Raptor*! Задача состояла в том, чтобы с помощью этой сети управлять одновременно бортовой и килевой качкой машины и тем самым поддерживать горизонтальный полет. Дабы это осуществить, два из 64 электродов субстрата применяли не только для измерения средней нейронной активности части сети, примыкающей к каждому из 64 электродов. Эти два электрода служили

также для отправления электрических импульсов в две соответствующие зоны сети. В этих условиях адекватный электронный монтаж позволял возбуждать (с регулярными интервалами, и притом возбуждать в большей или меньшей степени) имеющуюся нейронную сеть на уровне каждого возбуждающего электрода — в соответствии с относительным объемом поправок, которые следовало внести в углы бортовой и килевой качки. Паттерн, полученный в результате стимуляции электрода, связанного с бортовой качкой, служил для изменения угла элеронов. А паттерн, связанный с килевой качкой, влиял на руль высоты*. Вследствие описанных возбуждений модифицируются синаптические связи сети, а это открывает возможность обучения.



Рис. 12.4. Система контроля симулята *F22 Raptor* с помощью нейронов в отдельной культуре. (© Thomas DeMarse, University of Florida)

Действительно, пока положение самолета требует корректировки, соответствующие возбуждающие импульсы изменяют синаптические

*Авиационный термин. — Прим. перев.

веса нейронного контроллера и тем самым изменяют исходящие от него двигательные инструкции. Зато если данное положение однажды стабилизировано, контроллер больше не возбуждается и ничего не меняет с помощью команд.

Достигнутые на практике результаты вдохновляют, но они нестабильные и требуют коррекции. Аналогичные подходы были применены для управления реальными роботами. Одни роботы, действуя своими руками, были призваны создавать художественные рисунки, другие роботы, на колесах, должны были преследовать один другого. Кроме того, была предпринята работа, где контроль положения монопланёра основывался на полученных бортовой камерой картинках. Однако результаты этой работы неизвестны.

Мозг в виде изолированной культуры

Вместо одной изолированной клетки или нескольких тысяч нейронов, спонтанно реорганизующихся в сеть, в данном случае у животного изъяли целую функциональную часть нервной системы. И в серии экспериментов, проведенных в стенах Чикагского университета, гибридировали эту часть с роботом.

Таким образом, часть ствола головного мозга миноги, которая в норме служит для контроля положения тела (преобразуя информацию, идущую от вестибулярного аппарата и других сенсорных органов, в моторные команды, стабилизирующие ориентацию тела в процессе плавания), была использована для управления реакцией на свет одного робота на колесах. Моторные (двигательные) команды, обычно служащие для балансировки положения тела, были применены для контроля вращения колес.

Итак, в соответствии с состоянием электродов, служащих для возбуждения нервной ткани или для получения ее электрической активности, оказалось возможным разработать у робота рефлекс преследования или избегания света и изучить адаптивные возможности этой ткани. Например, когда робот сталкивался с асимметрично освещенным пространством и находился там несколько минут (далее свет исходил, например, справа, а не слева) — в синаптических связях контроллера происходили долговременные адаптивные изменения.

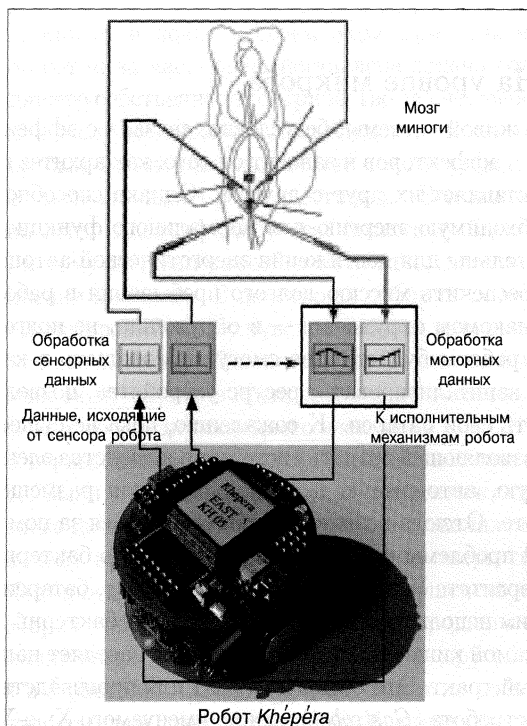


Рис. 12.5. Мозг миноги (вверху) служит для управления реакцией на свет маленького мобильного робота (внизу)

Рефлекс следования на свет выражался в том, что левое колесо вращалось быстрее правого и робот направлялся к более освещенной зоне. После привыкания к асимметрии освещения окружающего пространства разница в скорости вращения колес постепенно исчезала: робот осваивался в этой ситуации.

По мнению практикующих исследователей, этот тип опыта, по сравнению с традиционными нейрофизиологическими экспериментами, дает дополнительную полезную информацию относительно способов адаптации и обучения нервной системы.

Другие гибридизации

... На уровне микроба

Автономия живой системы, безусловно, связана с эффективностью ее сенсоров и эффекторов и зависит от того, как архитектура управления сопоставляет их друг с другом. Однако способности производить необходимую энергию для нормального функционирования тоже обязательны для достижения энергетической автономии.

Дабы обеспечить миссию долгого пребывания в рабочем состоянии в незнакомом окружении — в окружении, не подготовленном человеком, роботы будущего не смогут превращать в капитал (накапливать, капитализировать) ресурс устройства, позволяющий им перезарядить свои батареи. К сожалению, пока не существует технологии, позволяющей создать систему производства электричества, неистощимую, автономную и подходящую для размещения ее на самом роботе. Отсюда возникает идея обратиться за помощью в решении этой проблемы к живому миру, вплоть до бактерий.

В Университете Южной Флориды, например, батареи с микробным горючим используют за счет добрых услуг бактерий *Escherichia coli* — той самой кишечной палочки, которая населяет наш желудочно-кишечный тракт. Эти батареи служат для производства электричества у Гастробота (*Gastrobot*), нежно именуемого Хью-Хью (*Chew-Chew*). Гастробот — своеобразный поезд на колесах, около метра длиной, состоящий из вагончиков; первый вагончик нагружен батареями с топливом, полученным в результате жизнедеятельности бактерий. Через расположенный над батареей шланг порции сахара поступают мало-помалу в искусственный желудок. Там, гидролизуя углеводные цепочки, бактерии освобождают электроны, служащие для подзарядки находящихся в другом вагоне батарей, за счет окислительно-восстановительного процесса. Это хитрое устройство, однако, не очень совершенно, поскольку для полной зарядки батарей робот нуждается в трех порциях сахара, которые он «переваривает» не менее 18 часов...

Похожий на «пожирателя сахара» плотоядный робот *Stugbot* был сконструирован в Бристоле⁸⁹ его наградили подвижной рукой, на

конце которой расположены прожектор, захват и камера, благодаря чему он отыскивает и ловит в своем окружении слизняков (улиток) — около сотни за час. Была поставлена задача создать робота, производящего собственное электричество за счет переваривания этих слизней в желудке, похожем на желудок описанного выше робота. Выбор был остановлен на добыче такого рода, потому что она обладает несколькими преимуществами. Высоко энергетична и достаточно легко идентифицируется, поскольку блестит под лучами света, к тому же, малоспособна поспешно спастись бегством при приближении хищника. В некоторых публичных демонстрациях, дабы не травмировать особо чувствительных натур, слизи были заменены кусочками спелого банана. . . . Что бы там ни было, финансирование этих экспериментов прекратилось до того, как последняя улитка пала жертвой ради последнего электрона.

Хотя два первых описанных подхода весьма знаменательны, они, тем не менее, были заброшены, поскольку энергетический коэффициент полезного действия в обоих случаях представлялся очень низким. Вот почему процесс становления поисков энергетической автономии роботов основывается сейчас на усовершенствованной технологии, которая уповает на применение кислородного катода для экстрагирования электродов. Таков *Ecobot-II* — другой робот, разработанный в Бристоле. Он экипирован рядом из восьми батарей с микробным топливом, предоставленным бактериями, выделенными из грязи на соседней очистительной станции. Его батареи генерируют электричество на основе. . . мух, которыми они питаются. Эти бактерии разлагают глюкоиды, содержащиеся в экзоскелете насекомых, и производят достаточно электричества, чтобы робот мог не только перемещаться, но и делать другие полезные вещи: направляться на свет и передавать по радио на какую-нибудь отдаленную станцию сведения о температуре окружающей среды.

Соответствующие достижения пока скромные. Робот перемещается в среднем на протяжении 2–3 секунд каждые 15 минут и всего на расстояние 2–3 см. Затем он вынужден остановиться, чтобы аккумулялировать энергию, необходимую для передвижения, измерений и отправки информации. Однако он может выполнять свою миссию пять дней подряд за счет переваривания одной-единственной мухи в каждой из его топливных батарей.

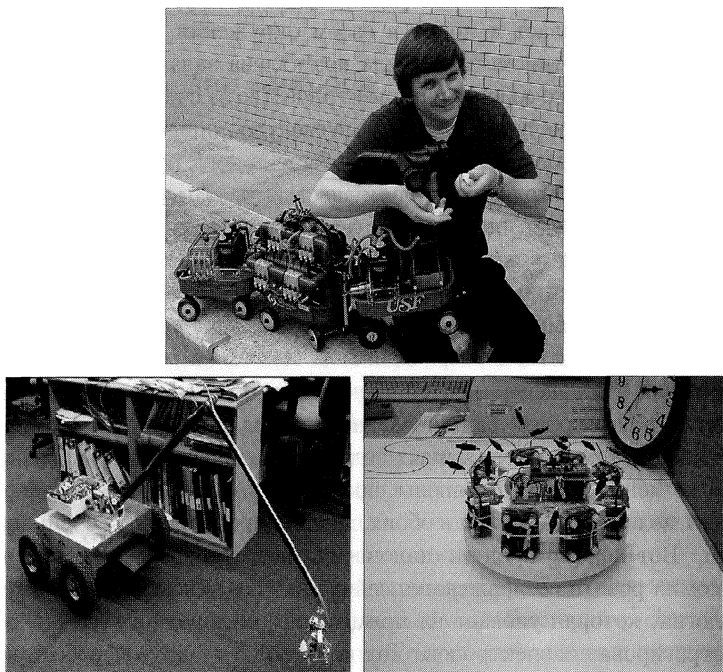


Рис. 12.6. Роботы, способные «переваривать» пищу. *Вверху:* Гастробот, или Хью-Хью, — робот, перерабатывающий сахар, и его создатель. (© *Stuart Wilkinson*, Университет Южной Флориды.) *Внизу слева:* охотник на слизней — *Slugbot*. *Внизу справа:* пожиратель мух — робот *Ecobot-II*. (© *Chris Melhuish*, *University of Bristol and University of the West of England*)

Эта работа оставляет надежду на улучшение энергетического снабжения. Хорошо бы, чтобы робот сам искал и ловил мух, в которых он нуждается, с помощью пахучих ловушек или светящихся приспособлений. Кроме того, можно использовать другие источники энергии — богатые сахаром фрукты или панцирь ракообразных.

... На уровне молекулы

В 1959 году Ричард Фейнман (*Feynman*), будущий обладатель Нобелевской премии по физике (1965), заявил о возможности конструирования

машин будущего атом за атомом при помощи других машин. Не прошло и 30 лет, когда в 1986 году появился туннельный микроскоп, позволяющий «увидеть» отдельные атомы⁹⁰. Эрик Дрекслер (*Drexler*) опубликовал в США свою работу «*Engines of Creation*». Эта работа на стыке атомной физики, инженерии и научной фантастики стала основой для *нанотехнологий* — нового поля исследований, о которых упоминалось в первой части книги. Сценарий по книге Дрекслера, недавно переведенной на французский⁹¹, мог бы воплотиться в апокалипсической пьесе, где наномашинны захватывают власть и поглощают мир. Хотя такого рода сценарии продолжают подпитывать научные споры, полемику в политических и общественных кругах, они, несомненно, вдохновляют и на создание более мирных наномашин (но вполне реальных), нацеленных на объединение биологических молекул с наноструктурами, сделанными человеком.

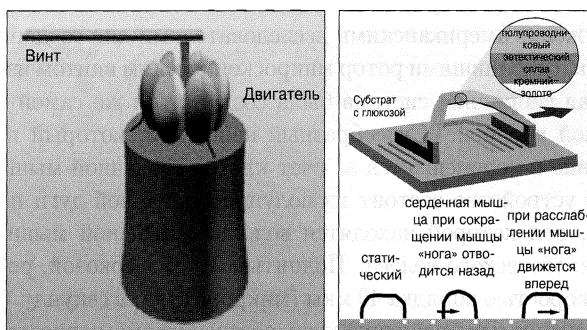


Рис. 12.7. Наномашинны. Слева: нановертолет с «двигателем» на основе F1-АТФ-азы (F1-аденозинтрифосфатазы). Справа: наноробот, ползающий благодаря мышечной клетке крысы

Сказанное касается, например, «самого маленького вертолета в мире», задуманного группой исследователей из Корнельского университета (*Cornell*)⁹², с использованием F1-АТФ-азы* — очень

*Фосфоглюконат аденозинтрифосфатазы. — Прим. ред.

распространенного в живом мире фермента, чьи качества вечного двигателя известны с 1967 года. Молекула аденозинтрифосфатазы состоит из подвижных белковых субъединиц и составляет в диаметре 12 нанометров. Она входит в состав липидной мембраны митохондрий и участвует в синтезе АТФ (аденозинтрифосфат) — другой известной молекулы, которая доставляет живым системам необходимую энергию. Молекула *F1*-АТФ-азы содержит своеобразный ротор в своей центральной части. Механизмы, поворачивающие субъединицы фермента в слое мембраны подобно ротору турбины, со скоростью около 130 оборотов в секунду, не вполне ясны. Похоже, что здесь задействован градиент протонов, созданный с той и другой стороны мембраны посредством своеобразных насосов*. Каждый раз, когда эти механизмы вынуждают ротор аденозинтрифосфатазы повернуться на 120° , в клетке синтезируется одна молекула АТФ. И наоборот, ротор принимается спонтанно поворачиваться, если он подпитывается молекулой АТФ. Именно это свойство и было взято на вооружение американскими исследователями для создания нановертолета, снабдившими ротор микроскопическим винтом из никеля!

Другая гибридная система была создана той же самой исследовательской группой. Своеобразный наноробот, который приходит в движение и перемещается за счет клеток сердечной мышцы крысы. Это устройство состоит из полупроводниковой дуги на основе кремния, под которой находятся волокна сердечной мышцы — не толще человеческого волоса. Подпитываемый глюкозой, робот ползает со скоростью порядка 40 мкм (микрометров) в секунду, благодаря растяжению и сокращению дуги, обеспечиваемому расслаблением и сокращением мышечных волокон.

Остается решить насущную проблему: как заставить этот нановертолет летать. И остается снабдить наноробота сенсорами и системой управления, которая сделала бы его действительно полезным. В целом же эти разработки открывают широкое поле практических приложений в долгосрочной перспективе. Скажем, можно

*Видимо, здесь речь идет о разнице потенциалов изнутри и снаружи мембраны, и смысл слова «насос» здесь именно такой, аналогичный «калиево-натриевому насосу» в нервных клетках. — *Прим. перев.*



было бы удалить закупоривающий артерию тромб или доставить необходимый медикамент в отдельно взятую клетку. И возможно, однажды удастся заменять поврежденный ген его синтетической копией, исправляя эти несовершенства прямо в ядре конкретной клетки.

ЖИВЫЕ ГИБРИДЫ

*При свете дня покрыта тайна мглой,
Природа свой покров не снимет перед нами,
Увы, чего не мог постигнуть ты душой,
Не объяснить тебе винтом и рычагами!*

Иоганн Вольфганг Гете*

Значение термина «бионика» в качестве научной дисциплины не очень известно широкой публике, но как эпитет, связанный с гибридными созданиями, он у всех на слуху. В знаменитых фельетонах 1970–1980-х годов рассказывалось о том, как американские секретные службы используют экстраординарные достижения мифического полковника Стива Остина (*Steve Austin*) — с одним глазом, двумя ногами и одной искусственной рукой, на пару с Джейми Соммерс (*Jaimie Sommers*), оставшейся после остросюжетных приключений с одним ухом, двумя ногами и одной *бионической* рукой. Во Франции этот сюжет более известен под названием «Человек, который стоит три миллиарда» (в наших старых деньгах, конечно[†]). Сейчас такая цена была бы очень удачной сделкой, поскольку длительная разработка всего одного-единственного киберпротеза примерно столько и стоит. Начиная с 1960 года, вслед за статьей в американском *Astronautics*⁹³,

* «Фауст», перевод с немецкого Н. Холодковского.

[†] Ирония авторов здесь, видимо, заключается в том, что в прежних французских франках (ныне замененных на евро) сумма 3 млрд не такая уж большая, по сравнению с ценами в евро. А о нынешней стоимости киберпротеза, по крайней мере на стадии его научной разработки, авторы говорят в самом начале следующей рубрики. — *Прим. перев.*

некоторые называют наделенные КИБерпротезами ОРГанизмы — киборгами (*cyborgs*).

Интеллектуальные протезы

Кибер-рука

Год спустя после начала финансирования проект *Cyberhand* уже потребовал более миллиона евро. Он объединяет множество европейских исследовательских групп⁹⁴. Проект ставит целью создать искусственную руку, способную восстанавливать сенсомоторную коммуникацию между такой рукой (в первую очередь речь идет о кисти и пальцах) и центральной нервной системой. Для этого понадобилось установить связь между разнородными нервными волокнами руки (сенсорными и моторными) и устройством с помощью специальных вживленных электродов. Кистью руки, на деле, будут управлять моторные волокна ее носителя, и благодаря сенсорным волокнам будет отражена экстероцептивная информация (осознание, давление, температурные ощущения), а также проприоцептивная (положение пальцев и руки). Аппарат имеет 16 степеней свободы. Он снабжен шестью микромоторами и покрыт мягкой тканью, в которой размещены различные сенсоры, — размещены примерно так же, как в естественной человеческой кисти и ладони, в большом и в других пальцах.

Первые разработки пока не достигли этапа подсоединения руки к человеку.

Что касается двигательных функций, то этот аппарат умеет обращаться с тонкими и хрупкими объектами, вроде картофельных чипсов, может взять тонкий стакан и наполнить его водой, и будет чувствовать тяжесть этого цилиндра. Если говорить о чувствительности, то он способен различать текстуру поверхности, ощущать температуру предмета, когда тот очень холодный или горячий, может определить, из металла предмет или из дерева. Именно этих видов чувствительности особенно недостает носителям пассивных протезов, и они не могут корректировать свои движения без такой обратной связи, идущей от сенсорных рецепторов.

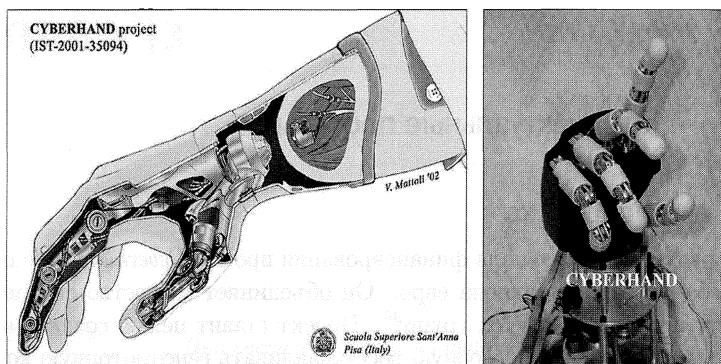


Рис. 13.1. Искусственная рука *Cyberhand* способна воспринимать ощущения. (© *Projet Cyberhand (IST-2001-35094) and Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa.*) (См. цветную вклейку)

Уже начались первые клинические испытания *Cyberhand* на пациентах. И осуществляются они с величайшей предосторожностью, поскольку электронные цепи должны быть имплантированы в руку пациента раз и навсегда. Речь идет о том, чтобы установить между природной частью конечности пациента и аппаратом процесс обучения — обучения умению согласовывать два типа инструкций: действительные намерения человека — носителя протеза выполнить то или иное действие с моторной реализацией этих действий аппаратом. Несмотря на технические трудности, исследователи полагают, что удастся выпустить коммерческую версию *Cyberhand* к 2011 году*.

Бионические рука†и нога

Основываясь на тех же принципах, исследователи канадского сообщества *Victhom Bionique Humaine* придумали бионическую ногу, способную предвосхищать движение, которое собирается сделать ее

*Здесь стоит напомнить, что во Франции эта книга была издана в 2008 году. — Прим. перев.

†В данном случае, говоря о руке, авторы используют другое слово — «*un bras*», оно (в отличие от употреблявшегося в предыдущем сюжете слова «*une main*»), означает уже не только кисть руки, но конечность целиком — вместе с плечом и предплечьем. — Прим. перев.

носитель. Координировать движения походки по горизонтали вместе с движениями подъема по лестнице теперь возможно благодаря особому программному модулю. Прежде пассивный протез требовал специального управления либо одним, либо другим видом передвижения. Нынешняя версия обладает автономией на 6–8 часов и отчасти подзаряжается за счет движений своего носителя, совершаемых в процессе ходьбы.

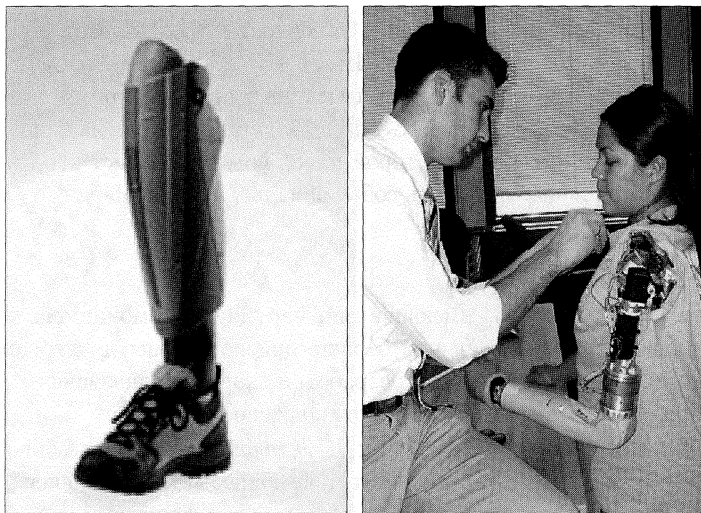


Рис. 13.2. Протезы, которые адаптируются к своим носителям. Слева: искусственная нога *A-Leg* сообщества *Victhom* (© *Victhom Bionique Humaine*.) Справа: бионическая рука Клаудии Митчел. (© *Rehabilitation Institute of Chicago*)

Кроме того, в американской прессе много внимания уделяли случаю Клаудии Митчел (*Mitchell*), бывшей служащей морской пехоты США, которой по плечо оторвало руку во время одной мотоаварии. Потребовалось пять часов на то, чтобы вживить ей в плечо бионическую руку, разработанную Чикагским институтом реабилитации (*Rehabilitation Institute of Chicago*). Эта рука обладает восемью степенями свободы, сообразно импульсам, исходящим от пациента — импульсам, которые направляются к грудным мышцам: хирурги

«ответвили» иннервирующие их нервные волокна по направлению к плечу. Для интерпретации взаимоотношений между сокращением мышц плеча и киберпротезом служит электронный чип. В свою очередь, рука передает на чип сенсорную информацию при задевании и хватании предметов. Теперь Клаудиа может выполнять множество обычных рутинных дел: хозяйничать на кухне, очищать от кожуры фрукты и овощи, заполнять посудомоечную машину и даже писать.

Различные войны в самых разных уголках мира, к сожалению, оставляют после себя лишенных конечностей людей. Вот почему агентство Департамента обороны США (*DARPA*) инвестировало 50 миллионов долларов ради совершенствования этого типа протезов. Как утверждает Джофрей Линг (*Geoffrey Ling*), эта программа нацелена создать «руку, пользуясь которой, наши солдаты смогут играть на пианино — и не какой-нибудь собачий вальс, а Брамса!».

Экзоскелеты

Существуют протезы, имеющие вид наружного комбинезона. Их американские версии обычно больше приспособлены для военных нужд и обороны, а японские разработки скорее предназначены для помощи людям, испытывающим физические трудности.

Японский *start-up* Кибердайн (*Cyberdyne*⁹⁵) создал комбинезон *HAL* (*Hybrid Assistive Limb*). Этот комбинезон предназначен для пожилых людей или страдающих каким-либо физическим недостатком. Такой робот для «ношения на себе» длиной 1,6 м весит 23 кг. Он способен интерпретировать электрические импульсы мускулатуры, регистрируемые прямо на поверхности кожи. Комбинезон *HAL*, кроме того, снабжен опорами для рук и ног, которые улучшают устойчивость и стабильность его носителя. Одетый в него человек может, например, без труда встать из своего кресла, подняться по лестнице и переносить грузы до 40 кг. Один японец, который уже более 20 лет страдает тетраплегией*, смог благодаря комбинезону *HAL* осуществить свою мечту — вскарабкаться на Брайтхорн† в Швейцарии.

*Паралич всех четырех конечностей (термин встречался выше). — Прим. перев.

†Брайтхорн (нем. *Breithorn*) — гора в Бернских Альпах, высота 3438 метров. — Прим. перев., по материалам Интернета.

Сейчас ведутся другие похожие проекты. Например, комбинезон *Cyberthèse* разрабатывается в Федеральной политехнической школе Лозанны, где программируют моторные приспособления для людей, страдающих физическими недугами.

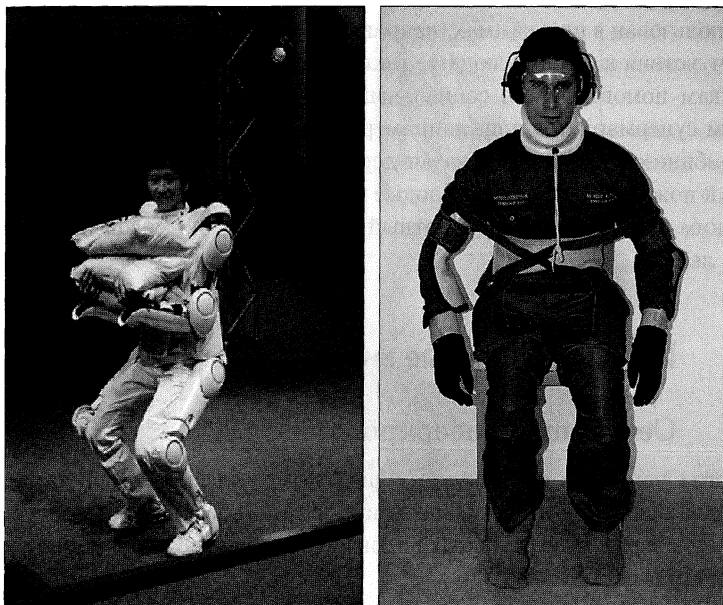


Рис. 13.3. Два экзоскелета: один интеллектуальный, а другой ... коварный. Слева: комбинезон HAL — «интеллектуальный» экзоскелет, помогающий улучшить устойчивость и физическую силу человека. (© Yoshiyuki Sankai, University of Tsukuba et CYBERDYNE Inc.) Справа: комбинезон Mobi симулирует сенсомоторные трудности людей в преклонном возрасте. (© Seniosphère, Париж)

Упомянем еще экзоскелеты, создаваемые в Англии, Германии и Франции, которые не предусматривают электронных чипов, но при этом являются не менее «интеллектуальными» практическими приложениями. Это симуляторы старости! В частности, французское сообщество *Seniosphère* выпустило в продажу английский комбинезон *Mobi*, позволяющий молодым людям ощутить и понять, каково

это жить и выполнять повседневные дела, будучи человеком 80-летнего возраста. Его плотная ткань снабжена жесткими элементами, утяжеляющими движения и затрудняющими их гибкость, как бывает при развитом артрозе. А очки и слуховой аппарат, аналогично, симулируют различные сенсорные нарушения. Этот комбинезон был использован в программах, направленных на повышение внимания и сочувствия к старым людям. Такие программы необходимы сотрудникам помогающих и социальных служб, архитекторам, директорам супермаркетов или, например, кинезитерапевтам*. Изначально комбинезон *Mobi* был заказан директором предприятия *Ford*, который пожелал, чтобы его молодые инженеры смогли прочувствовать, каким должен быть комфортный автомобиль для человека старше 50 лет.

Интеллектуальные эндопротезы

Сенсорные киберпротезы

Когда пациенты страдают нарушениями в сенсорных органах или рецепторах, но у них сохранены интактные сенсорные ветви нервов, то некоторые из утраченных видов чувствительности могут быть частично восстановлены.

После долговременной практики вживления громоздких и неудобных электродов в череп слабовидящих пациентов исследователи придумали более падающее и компактное устройство. В системе *Argus II* университета Южной Калифорнии⁹⁶ используется камера, монтированная на очки. Она передает информацию на искусственную сетчатку, объединяющую 60 микроэлектродов, а та, в свою очередь, отправляет электрические импульсы зрительному нерву. Такой тип импланта позволяет страдающим дегенерацией сетчатки улавливать формы предметов, свет и движения. Те добровольцы, что в начале эксперимента могли различить лишь световые пятна, вскоре быстро научились различать препятствия на дороге и даже лица. Бионическое

* Специалисты, занимающиеся двигательной реабилитацией инвалидов. — Прим. перев.

ухо появится на рынке в 2009 году, его предполагаемая цена 30 000 долларов.

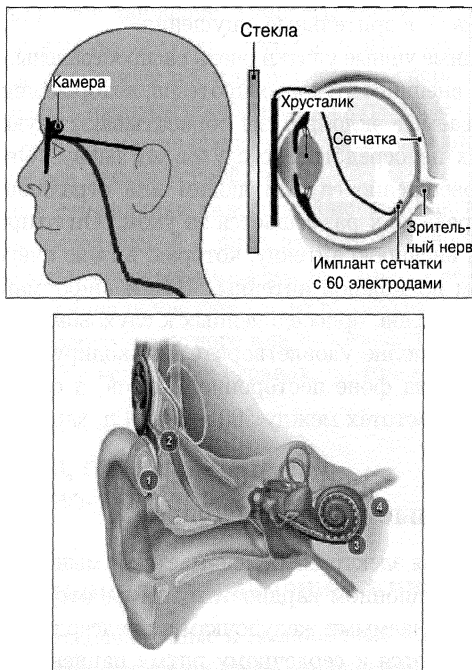


Рис. 13.4. Сенсорные киберпротезы. *Вверху:* искусственная сетчатка *Argus II*. Камера, поставленная на стекла, улавливает изображения, которые обрабатываются и потом отправляются к импланту сетчатки в глазу. Электроды импланта активизируют нейроны зрительного нерва, который благодаря этому может передавать соответствующие сигналы в зрительные зоны коры больших полушарий мозга. *Внизу:* искусственная улитка *DIGISONIC*. 1. Внешний датчик конвертирует воспринимаемые звуки в цифровые сигналы; 2. Процессор отправляет эти сигналы внутреннему импланту; 3. Имплант преобразует эти сигналы в электрические, обычно отправляемые улиткой внутреннего уха; 4. Электроды улавливают эти сигналы и стимулируют слуховой нерв, подобно естественным клеткам улитки, и пациент слышит

Различные устройства предполагают возможность «видеть» ушами или за счет стимуляции языка. В них используются электронные чипы, переводящие звуковые сигналы или слабые электрические стимуляции языка — в зрительные ощущения.

Искусственные ушные улитки очень распространены. Однако в отличие от этих внешних слуховых протезов, которые лишь усиливают звуки, описываемые эндопротезы обрабатывают звуковые сигналы и передают их непосредственно слуховому нерву. Они даже рекомендованы совершенно глухим людям или страдающим глубокой глухотой. Передатчик размещается за ухом. Он отправляет звуковой сигнал на внешнюю антенну, которая, в свою очередь, передает их рецепторам подкожной антенны. Затем информация следует к ансамблю электродов, присоединенных к слуховому нерву. Импланты такого типа вполне удовлетворительно кодируют и декодируют значимые звуки на фоне постороннего шума, и особенно звуки на «разговорных» частотах между 500 и 3000 Гц, характерных для человеческой речи.

Мышечные киберпротезы

Интеллектуальная электроника занимается и мышечными стимуляторами. В традиционном кардиостимуляторе отсрочка между стимуляциями, посылаемыми желудочкам и предсердию, фиксирована, т.е. не адаптируется к сердечному ритму пациента в зависимости от того, отдыхает он или бежит, или, допустим, недомогает (при этом меняется сердечный ритм). Проект *Adapter*, в котором участвуют лаборатории Страсбурга и Ренна и с которым сотрудничают три предприятия, ставит целью в трехлетний срок создать эндопротез с варьирующей стимуляцией — изменяющейся в зависимости от показателей, которые постоянно поступают от усовершенствованных датчиков, имплантированных в сердце пациента.

Европейская программа *SUAW*⁹⁷ (*Stand Up And Walk*)* предполагает стимулировать движения походки у пациентов с поврежденным спинным мозгом. В данном случае двигательные нервы больше не функционируют, но мышцы ног остаются неповрежденными.

* «Встань и иди».

С помощью электростимуляции побуждаются непосредственно мышцы. Небольшая коробочка — портативное программное устройство — координирует посылаемые электрические импульсы так, чтобы организовать то или иное движение. Пациент, например, может нажать кнопку, чтобы встать, другую — чтобы пойти, поддерживая равновесие с помощью костылей или без них. Теперь исследователи пытаются заменить имплантированные электродные нити (чреватые инфицированием) на другие средства, а также предполагают миниатюризировать все детали устройства.

Эти техники стимуляции кажутся поистине благими для улучшения возможностей людей с физическими трудностями. Однако есть такие методы, которые нацелены не столько на временное облегчение проблем инвалидов, сколько на контролирование организма совершенно здорового животного или человека! Комитеты по этике весьма бдительны в некоторых странах, но только в некоторых...

Протезы, предназначенные для радио-контроля

Дистанционное управление животными...

Самые разные беспозвоночные и позвоночные животные были превращены в объекты дистанционного управления. *Robo-roach* — это бионический таракан, результат работы двух групп — японской и швейцарской. Таракан снабжен электродами, которые посылают стимулы к его нервным ганглиям, указывая носителю, что надо двигаться вперед, повернуть налево или направо — в соответствии с командами человека-оператора, передаваемыми через компьютер.

Сотрудники Роботинженерного центра технологических исследований в Шандонге, Китай, применили подобный метод к голубю. Благодаря вживленным электродам они могли указать ему: лететь прямо, налево, выше или ниже.

Аргументы, которыми пытаются оправдать такого рода эксперименты, апеллируют к роли, которую эти животные, будучи снабжены миниатюрной камерой и микрофоном, могут играть в помощи

пострадавшим в несчастных случаях и катастрофах или общественном надзоре. Разумеется, военные цели тоже не забыты. . .

... И радиоуправляемый человек!

Можно подумать, что подобные устройства размещают только на животных. . . Но одно японское предприятие (фирма) преодолело сей Рубикон. Лаборатории *Nippon Telegraph & Telephon Communication Science* разработали аппарат «гальванической вестибулярной стимуляции». Он отправляет электрические импульсы улитке внутреннего уха человека (здесь важно уточнить, что человек — доброволец).



Рис. 13.5. Радиоуправляемый человек за счет гальванической вестибулярной стимуляции! (© Naohisa Nagaya, The University of Electro-Communications, Tokyo)

Сигналы приходят в то место, где находятся сенсорные рецепторы равновесия. Легкий ток на уровне левой или правой стороны улитки неминуемо заставляет субъекта отклониться в том же направлении — включается рефлекс восстановления равновесия, поскольку при такой стимуляции человек ощущает, что потерял равновесие. Помимо возможных однозначно полезных применений этого устройства, таких как: быстрое отклонение пешехода от траектории приближающейся

машины или управление равновесием у пожилых людей, предполагаются и другие — скорее игровые его назначения. Например, можно было бы подсоединить его к МРЗ-плееру, чтобы рефлекторно управлять танцевальными движениями сушателя музыки, меняя их в зависимости от музыкального ритма!

Далекий от того, чтобы задумываться о последствиях такого рода опыта, один исследователь из Медицинской школы Вашингтонского университета (*Washington University School of Medicine*) ратует за применение электромагнитных полей для *дистанционного* влияния на вестибулярный аппарат человека предварительно не оснащенного каким-либо устройством. Он предлагает использовать это в военных целях, а заодно в гражданских: например, чтобы зрители, сидя в театре или на стадионе, могли переживать ощущения, аналогичные ощущениям танцора или спортсмена. По нашим сведениям, этот проект не получил никакой поддержки — ни научной, ни финансовой. ... Пока не получил.

«Эндопротезное» обучение?

Исследователи из медицинского центра *Downstate Medical Center* Нью-Йоркского университета⁹⁸ тоже оказались способными дистанционно управлять млекопитающими, в данном случае — крысами. В отличие от манипуляторов, примененных в опытах с упомянутыми выше тараканом и голубем, непосредственно стимулировавших моторные зоны, здесь предполагают настоящее обучение с подкреплением, основанное на стимуляции других зон нервной системы подопытного. Таким путем можно установить ассоциативную связь между сенсорными стимулами и какими-нибудь действиями.

Для этого исследователи поместили тонкие электроды в сенсорные зоны коры, соответствующие правым и левым вибриссам крысы, а другие электроды в нейронные цепи «вознаграждения»⁹⁹, стимуляция которых порождает у животного чувство удовольствия. Крыса должна усвоить, что надо поворачивать направо (или налево) — когда стимулируются правые (или левые) вибриссы, либо направляться прямо — когда вибриссы стимулируют одновременно с двух

сторон. Для такого научения крыса получает вознаграждающую стимуляцию правильного поведения.

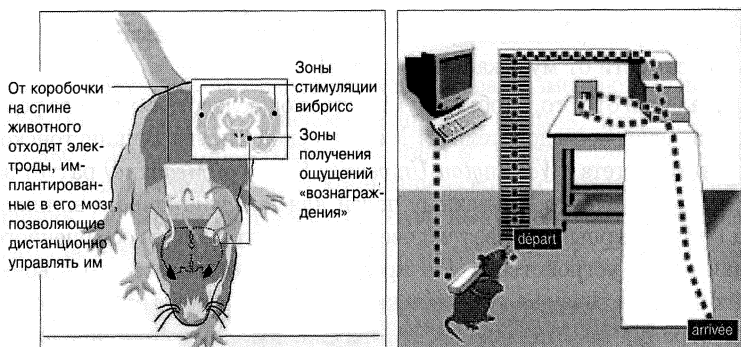


Рис. 13.6. Радиоуправляемая крыса усваивает определенный маршрут. Слева: схема дистанционного управления крысой. Справа: один из маршрутов, который «подкрепляют» у крысы за счет радиоуправления

Животное очень быстро улавливает связь между стимуляцией вибрисс и собственными локомоторными действиями. Оснащенная сбруей крыса — сбруей, содержащей микростимулятор, управляемый дистанционно, с компьютера, — тоже становится дистанционно управляемой и следует по принужденным траекториям, которые никогда не были бы освоены ею естественным путем. Например, крыса карабкается на высокую лестницу или пересекает очень сильно освещенное пространство.

Тем же методом крысу научили замирать на 10 секунд, когда она различает запах взрывчатки. Исследователи полагают, что можно будет использовать таких радиоуправляемых животных в службах спасения и для определения местонахождения взрывных устройств. По их словам, хотя описанная экипировка животного стоит недешево, это все же дешевле, чем создавать роботов специально для такого рода миссий!

Эндопротезы стимулирующие и регистрирующие

Предыдущие исследователи не подступились к сигналам, естественным образом возникающим и обрабатываемым в нервной системе крысы. В других американских лабораториях проводились эксперименты, где подопытным субъектом не только управляли, но и регистрировали его ощущения. Так, уже не раз упоминавшееся агентство *DARPA* финансировало исследования в Бостонском университете, ставившие целью вживить регистрирующие электроды в сенсорные цепи маленьких акул длиной метр — в те цепи, которые позволяют акуле определять электрические поля и запах преследуемой добычи. Микропроцессор переводил эти данные в полезные для человека сведения, такие как близость рыб, мин и подводных лодок.

Можно было бы имплантировать им другие электроды — не регистрирующие, а стимулирующие, чтобы вызывать у акул ложное впечатление присутствия добычи и таким образом направлять их к predetermined мишеням. Эта программа исследований вскоре была классифицирована агентством *DARPA* как имеющая секретно-оборонное значение, ибо безмолвные и энергетически совершенно автономные акулы могут быть прекрасными шпионами. И притом гораздо более эффективными, чем роботы. Официально этот проект сейчас продолжает центр *Naval Undersea Warfare Center* в Ньюпорте, который проводит более фундаментальные научные изыскания. Исследователи упомянутого центра стремятся понять механизмы обработки сенсорных данных у этих животных, и особенно: каким образом акулы используют магнитное поле Земли для ориентации в пространстве. Такие работы могут также послужить для поиска косяков рыбы или регистрации изменений температуры в океане, или даже для отвода больших акул от берегов Флориды.

Двойные агенты среди тараканов

Эндопротезы могут быть еще использованы для манипуляции поведением животного. Один очень оригинальный эксперимент показывает, что нечто подобное возможно не только на уровне одного

организма, но и на уровне группы. Было продемонстрировано, что можно манипулировать коллективным поведением колонии тараканов «внедрив» в нее несколько робототехнических агентов! Это задача европейского проекта *Leurre*¹⁰⁰, он изучает возможность создавать смешанные группы, где в сообщество животных интегрированы роботы.

Миниатюрные роботы *InsBot* (*Insect-like robots**) все же не очень похожи на своих будущих соплеменников. Эти кубики на колесах снабжены инфракрасными сенсорами и одним световым сенсором, чтобы различать препятствия и окружающих насекомых, а также идентифицировать области темноты, где тараканы обычно рефлекторно прячутся. Он может определять обонятельные сигналы насекомых и испускать опознавательные феромоны группы, чтобы общаться с ней.

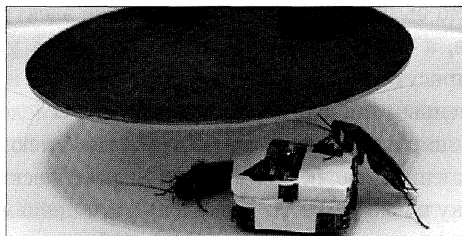


Рис. 13.7. Проект *Leurre*. Одному из роботов ИнсБотов (*InsBot*) удалось склонить тараканов к предпочтению частично затененных областей. (© Проект *Leurre*. Свободный университет Брюсселя и Федеральная политехническая школа Лозанны.) (См. цветную вклейку)

Исследователи сначала установили главные особенности поведения тараканов: детали их перемещения, зависящие от случая; частоту их остановок; вероятность остаться в стороне от соплеменников и т. п. ИнсБоты (*InsBot*) были снабжены программой, позволяющей им демонстрировать похожее поведение, чтобы перемещаться в группе в неагрессивной манере и адекватно реагировать на химические сигналы «сородичей».

*Роботы, подобные насекомому.

В результате исследователи спровоцировали такое поведение тараканов (как они сами выразились: «в принудительном порядке»), которое не наблюдалось в отсутствие роботов среди них. Например, тараканы меняли коллективный выбор укрытий. Действительно, когда изолированный одиночный таракан имеет выбор между разными затемненными зонами, более или менее удобными, он выбирает одну из зон стихийно. Именно благодаря химической коммуникации между собой тараканы мало-помалу перемещаются в зону, наиболее «одобряемую» сообществом. ИнсБотам удалось манипулировать социальной коммуникацией, дабы увлечь за собой соплеменников в частично затененные зоны.

Кроме того, исследователи заметили, что группа тараканов сохранила склонность прятаться в тех же укрытиях, даже когда ИнсБотов из нее убрали.

Помимо значимости этих исследований для понимания самоорганизации групп насекомых здесь просматриваются и возможные практические приложения. В частности, меры по уничтожению насекомых могли бы основываться на способности роботов привести группу тараканов в определенное место, где их можно было бы уничтожить, — как это сделал крысолов Гамелин с крысами в сказке братьев Гримм¹⁰¹, играя на флейте, или поэт Вергилий с неаполитанскими мухами...

Эндопротезы для идентификации

Перейдем к примерам более классическим, иллюстрирующим широкое поле применения эндопротезов.

Подобно тому, как автомобиль маркируют на случай угона, человеческое тело вскоре тоже сможет предоставлять идентификационное досье. Американско-канадская фирма *Verichips* продает имплантируемые электронные чипы размером с рисовое зернышко, способные содержать идентификационную информацию об индивиде, заключенную в 16-значном номере. Чип вводят под кожу безболезненным способом, и он не создает риска инфекции. Американское официальное ведомство лекарств и пищевых продуктов (*Food and Drug Administration*) уже разрешило его применение в первом

чтении, а в других странах, преимущественно в Южной Америке, этот чип одобрен полностью. Большинство таких чипов предназначено для хранения медицинского досье, которым можно воспользоваться, только если его носитель находится в бессознательном состоянии. Другие снабжены радиочастотными системами, вроде *GPS*, которые выдают, где находится пожилой человек, ребенок или домашнее животное, или же биометрическими системами — своего рода имплантированными пропусками (бейджиками), которые предъявляют, чтобы войти туда, куда пускают не всех. Именно это последнее поле применения было возобновлено генеральным прокурором Мехико и его группой, чтобы контролировать доступ к секретным документам, касающимся войны с картелями поставщиков наркотиков.

Что же касается этих микрочипов, то нельзя обойти молчанием случай Кевина Варвика (*Warwick*), профессора кибернетики из Рединг Университета в Англии. Ему пришла в голову несуразная идея имплантировать себе в предплечье стеклянную капсулу, передающую сигналы, которые служили дистанционными командами дверям открываться перед ним, а также командами включения света или двигавшими на расстоянии роботической рукой. Помимо этого, он претендовал на получение первого опыта «электронной коммуникации» с другим человеческим созданием — своей женой, вживив и ей такое же устройство. Но, похоже, результаты оказались гораздо скромнее, чем он полагал!

Другие работы ставят долговременные цели, более серьезные и полезные. Например, использовать этот тип эндопротезов для введения пациентам медикаментов по мере надобности и притом дистанционно. Это было бы революцией в терапии, особенно терапии диабетиков, например.

Дух — над материей

Некоторые из описанных выше исследований оставляют впечатление неловкости, поскольку их вроде бы благие намерения предполагают дистанционное контролирование подопытного субъекта, и такие разработки легко могут быть обращены во зло. В том числе и носители

идентификационных чипов отнюдь не защищены от подтасовок и фальсификации регистрируемых данных.

Нижеследующие работы — совсем другого рода. В них бразды правления распределены противоположным образом: здесь не электроника повелевает субъектом, а нервные импульсы субъекта командуют машиной.

Суть в том, что здесь, в режиме реального времени, регистрируется (с помощью мульти-электродных устройств — так называемых *нейропротезов*) электрическая активность разнообразных популяций сенсорных и моторных нейронов и затем соответствующая информация переводится в двигательные команды, активизирующие машину — компьютер или робота*. Для реализации этого принципа практикуют различные методики регистрации. Инвазивные и полуинвазивные техники регистрируют электрические нервные сигналы с помощью нейропротезов, вживленных под череп или непосредственно в соответствующие зоны коры. Неинвазивные техники регистрируют электроэнцефалограмму (ЭЭГ), как при медицинском обследовании, — с помощью поверхностной электродной накладки (шапочки), покрытой многочисленными электродами.

На долю таких экспериментов выделяют огромный бюджет. Эти вклады предполагают разработку того, что называется *интерфейсом мозг-компьютер* или *мозг-машина*¹⁰², чье предназначение — улучшить качество жизни людей с физическими ограничениями в плане их двигательных возможностей.

Инвазивные нейропротезы

Эксперименты с инвазивными нейропротезами — не из последних, они начались в 1970-х годах¹⁰³. Однако была и еще более ранняя работа,

*Имеется в виду создание внешних устройств, управляемых непосредственно электрической активностью нервной системы. Например, создание протеза, соответствующее движение которого запускается нервным импульсом (а точнее — ансамблем нервных импульсов — специфическим *паттерном* возбуждения группы нейронов), возникающим в мозге при намерении человека, допустим, протянуть к какому-то предмету руку, даже если эта рука отсутствует или парализована. Базовые разработки таких устройств уже существуют. Например, в июле 2006 года группа ученых из Университета Брауна (США), возглавляемая неврологом Джоном Донохью, апробировала эту методику на людях.). — *Прим. перев.*

очень мало известная, хотя она относится к 1964 году и принадлежит тому самому Уильяму Грею Уолтеру — отцу кибернетических черепашек, упоминавшихся в главе 5. Он же был первым разработчиком устройств для регистрации электроэнцефалограммы (ЭЭГ). В том раннем эксперименте, названном «прекогнитивной каруселью», Уолтер использовал нескольких испытуемых с уже установленными регистрирующими электродами в их моторной коре — установленными для лечебных нужд. Он предлагал им посылать дистанционные команды, тем самым воздействуя на проектор, чтобы тот показывал диапозитивы. Притом Уолтер не предупреждал испытуемых, что эти дистанционные команды определяются не чем иным, как электроэнцефалографическими сигналами их мозга. Эти сигналы усиливались и передавались прямо механизму смены фото! Очень скоро испытуемые почувствовали себя неловко, ибо диапозитивы появлялись на экране *до того* как они успевали нажать на кнопку дистанционной команды, — появлялись в тот же момент, когда у человека возникало намерение это сделать!

Потребовалось более 20 лет, чтобы нейропротезы утвердили свою операциональность. Действительно, такие нейропротезы должны быть установлены в нервной ткани на продолжительное время, чтобы можно было одновременно регистрировать (множеством электродов в разных зонах коры) большие популяции нейронов (более 100 единиц или даже 1000). Риски от подобных хирургических вмешательств далеко не безобидны и должны быть тщательно взвешены. Кроме того, необходимо, чтобы эти устройства посылали достаточно точные сигналы, которые могут быть корректно переработаны. К тому же здесь требуются довольно мудреные алгоритмы для обработки и категоризации нейронной активности, дабы она соответствовала тем движениям, которые намерен совершить субъект, а еще лучше — превосходить их.

Над этими техническими и методологическими проблемами работают многие лаборатории. Проекты под общим именем *Direct Brain Interface* ведут группы американских и австрийских исследователей. А проект *BrainGate* американского общества *Cyberkinetics Neurotechnology Systems* ставит целью управлять при помощи «мысли» мобильными аппаратами и устройствами коммуникации —

голосовой и письменной. Это предназначено для людей с серьезными повреждениями спинного мозга, пациентов с мышечной дистрофией, а также для страдающих синдромом *Locked-In Syndrom (LIS)*, при котором человек оказывается как бы заперт в собственном теле, оставшись с минимумом сигналов моторной коммуникации¹⁰⁴. Хотя эти работы, бесспорно, улучшают жизнь пациентов, имеющиеся разработки пока еще не вышли за пределы очень простых двигательных действий: скажем, включить какой-нибудь выключатель; усилить звук телевизора; передвинуть руку-робот.

К наиболее успешным на сегодняшний день работам относятся исследования Мигеля Николелиса (*Nicolelis*), он профессор нейробиологии Нейроинженерного центра университета в Дюке (*Duke*) и профессор нейронаук в швейцарском *EPFL*. Николелис ставил опыты с инвазивными протезами на крысах, а затем на обезьянах. В его лаборатории макаки-резус, например, научились управлять движениями руки-робота — управлять так, чтобы эта рука переместилась к определенной точке и чтобы расположенный на ее конце захват мог выполнить определенное хватательное усилие.

Это осуществлялось за счет активности сотен нейронов, передаваемой на мультиэлектроды, вживленные (имплантированные) в различные зоны теменных и лобных долей коры обезьяны. Точнее говоря, это были сенсорные и моторные области коры.

На стадии обучения обезьяна двигает джойстиком, чтобы на экране направить курсор к светящемуся кругу, расположение и размер которого информирует о расстоянии от захвата руки-робота до цели, а также о силе захвата. Когда обезьяна достигает желаемого сочетания движений, она получает вознаграждение — фруктовый сок. Все это время компьютер анализирует собранные электродами сигналы, категоризирует их и соотносит связь определенных электрических паттернов с определенными движениями курсора и руки-робота.

Активность мозга обезьяны — соответствующая движениям ее руки, когда обезьяна двигает джойстиком, стараясь переместить курсор к мишени, — регистрируется компьютером. Эта активность переводится в электрические импульсы, которые заставляют двигаться руку-робота тем же манером, что движется рука обезьяны. После такой предварительной подготовки обезьяне достаточно «подумать» протянуть руку, и курсор тут же перемещается к мишени,

а искусственная рука-робот выполняет движение, которое сама обезьяна не делает.

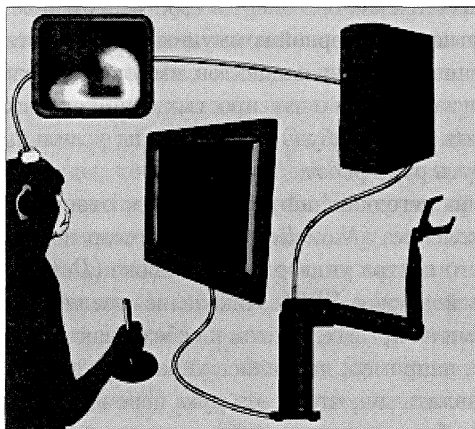


Рис. 13.8. Один из экспериментов интерфейса мозг–компьютер с применением инвазивных нейропротезов у обезьяны

После стадии освоения джойстик убирают. Отмечено, что некоторые обезьяны начинают шевелить своей рукой, как делали перед этим, хотя и впустую, поскольку они уловили, что могут таким образом управлять курсором и рукой-роботом. Однако теперь дело за компьютером. Он продолжает анализировать нейронную активность, провоцирующую соответствующее движение, дабы распознать нужный паттерн. Замечено также, что после нескольких опытов некоторые обезьяны не пытаются больше выполнять никаких движений, а «прилаживаются» управлять рукой-роботом «силой мысли»* в целях получения вознаграждения. И вот примечательная

* Авторы не зря взяли это выражение в кавычки, ведь управление движением, строго говоря, не является мыслью. Это автоматический, чисто рефлекторный акт, не требующий никакого участия сознания и мышления (и даже наоборот, если к такому рефлекторному действию подключается мышление, то само это движение — да и его рассудочный анализ тоже — рискует потерпеть фиаско: как та сороконожка, которую спросили, как она управляется со всеми своими лапками, и она не смогла сдвинуться с места...). Таким образом, здесь речь идет лишь о простом двигательном намерении. И хотя само намерение может быть и осознанным, механизмы его осуществления (в том числе искомые нейронные паттерны) никак с собственно мышлением не связаны. — *Прим. перев.*

деталь. Сканирование мозга таких обезьян, позволяющее получить изображения областей коры, соответствующих телесной репрезентации (репрезентации руки), показывает, что у животных это представление в мозге реорганизовалось и включает теперь искусственную руку как естественное продолжение их тела.

В аналогичных исследованиях недавно одной обезьяне удалось привести в движение ноги двуногого робота таким же способом. Это первый этап на пути к управлению ходьбой.

Неинвазивные протезы

Как считают специалисты, будущее инвазивных протезов весьма неопределенно из-за этических проблем, которые с ними связаны. И поэтому многие обращаются к другим методикам, в частности тем, что предполагают применение неинвазивных протезов — с накладками из множественных электродов, регистрирующих электроэнцефалограмму субъекта. Подобные устройства вызывают интерес, поскольку ничто не мешает их применить к любому человеку, выразившему свое согласие. Однако этот метод порождает другие проблемы. Обработка данных здесь затруднена, ибо сигналы, которые следует использовать, значительно слабее, чем в предыдущем случае. Неинвазивные протезы в настоящее время, похоже, позволяют давать очень простые моторные команды и не управляют сложными движениями машин — движениями со множеством степеней свободы.

Такие исследования ведутся во многих лабораториях, но стоит особенно упомянуть лабораторию *BrainLab* в Университете Джорджии и Институт производственного оборудования и конструкционной техники им. Фраунгофера (*Fraunhofer*) в Берлине. В первой лаборатории разработали устройство, которое перемещает электрическое кресло на колесиках и позволяет осуществлять ментальный поиск в Интернете — правда, пока очень сокращенный. А в институте Фраунгофера задумали «машину для ментального письма» *Hex-o-Spell*, с помощью которой субъект в шапочке-накладке со 128 электродами выбирает на экране компьютера букву за буквой того слова, которое хочет написать. Этот выбор делится на этапы. Субъект останавливается сначала на отдельной группе букв, потом на избранной

букве этой группы. Выбор основывается на мозговых волнах, обозначаемых «P300» — позитивная активация коры, возникающая примерно через 300 миллисекунд после того, как мы распознали ожидаемый стимул. Благодаря этому устройству человек может сейчас писать почти десяток слов в минуту.

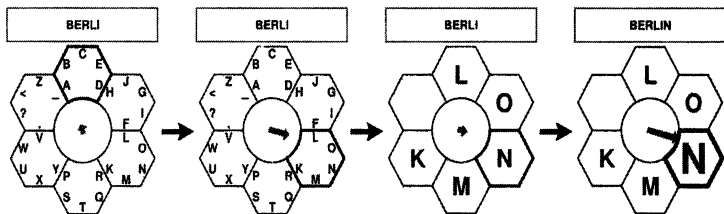
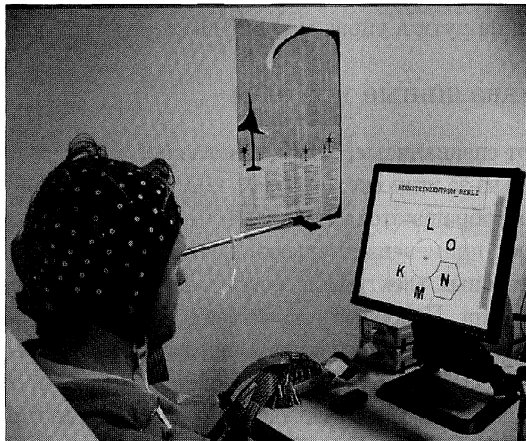


Рис. 13.9. «Машина для ментального письма». *Вверху:* неинвазивный протез — вид «машины для ментального письма» *Hex-o-Spell*. (© Klaus Müller, Technical University of Berlin.) *Внизу:* этапы выбора буквы с помощью «мысли» при помощи этого устройства. Субъект мысленно выбирает области, все более и более детализированные, в которых находится задуманная буква

Другие лаборатории участвуют в европейском проекте *Adaptive Brain Interface (ABI)* швейцарского института *Dalle Molle Institute for Perceptual Artificial Intelligence*¹⁰⁵. Эта работа особенно сосредоточена на поиске алгоритмов переработки мультимодальных нейронных данных. Она уже позволила испытуемым (это были люди) дистанционно управлять маленьким роботом, мысленно отдавая ему указания исполнить простые действия, например: пойти вперед, повернуть налево или направо.

Результатов, несомненно гораздо более оригинальных, удалось достичь профессору Тюбингенского университета¹⁰⁶. Вложив деньги, полученные вместе с премией Лейбница за свои предыдущие работы, он финансировал собственную разработку системы, которую назвал «устройством выражения мыслей» («*Thought Translation Device*»). Благодаря этому устройству люди, страдающие «синдромом пребывания внутри себя» (упомянутый выше *Locked-In Syndrome*) могут после месяцев тренировки составлять сообщения с помощью виртуальной клавиатуры. Пользуясь именно данным методом, один пациент постарался выразить профессору слова благодарности при посредничестве журнала *Nature* и он же пояснил свой метод мысленного выражения в интервью для журнала *New Scientist*!

Приведем еще один европейский проект, координируемый лабораторией в австрийском Технологическом университете Граца (*Graz*). Исследователи использовали здесь виртуальную реальность для более детального анализа взаимодействий между субъектом и трехмерной средой, которые в данном случае можно прекрасно контролировать. В одном из таких экспериментов испытуемому предписывают идти по пешеходной улице с многочисленными магазинчиками по ее сторонам, воображая при том, что он выполняет соответствующие движения руками и ногами. Он может остановиться на этой улице, может затеять разговор с персонажами¹⁰⁷, встречающимися на его пути. При этом имеется в виду, что испытуемый постарается остановиться на приемлемом для себя расстоянии от собеседника.

Прогресс различных методов применения неинвазивных нейропротезов обещает многое. Однако здесь невозможно скрыть и остающиеся сложности. Соответствующие виды обучения могут занимать немало времени, и они довольно трудны, так что не все субъекты

смогут их одолеть. А вспомогательные возможности управления, предоставляемые этими техниками, пока еще слишком элементарны. Поэтому не приходится надеяться на скорое массовое внедрение таких методов.

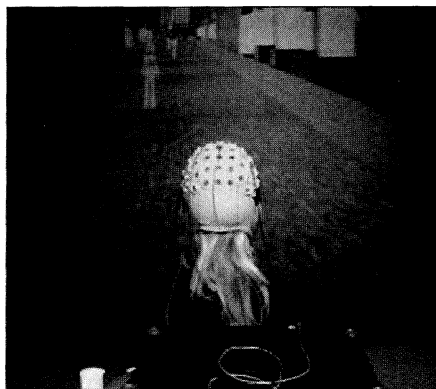


Рис. 13.10. Эксперимент Технологического университета Граца (*Graz*) с прогулкой по виртуальному пространству, «контролируемой ментально». (© Robert Leeb, *Graz University of Technology*)

Именно по этой причине объектом многих исследований являются биологические сигналы иного рода, чем нейронная активация. Например, регистрируемые мышечные сигналы, сигналы на поверхности кожи или приток крови к определенным областям мозга. В центре *Ames Research Center* агентства *NASA*, в Калифорнии, работают, в частности, с субголосовыми (дозвуковыми) движениями гортани человека. В горле испытуемого размещают три регистрирующих электрода, и он произносит слышимые им слова беззвучно — не голосом. Происходящие при этом микросокращения мышц гортани и мышц языка — когда человек читает «про себя» каждое слово — переводятся в звук или текст. Правда, эта система еще далека от совершенства, поскольку может составить пока не более 20 слов, а цифры — только от нуля до девяти.

Ее создатели предполагают разработать удобный портативный аппарат, который потребуется людям, работающим в шумном окружении,



или тем, кто хочет приватно, беззвучно, поговорить по мобильному телефону в людном месте... Это изобретение наверно больше всего оценят их соседи — сидящие рядом на театральном спектакле зрители или попутчики в общественном транспорте!

Заключение

Мир — прекрасная книга, но он не доступен тому, кто не умеет его читать.

Карло Гольдони

Наши многочисленные экскурсии по изобретениям, связанным с новой бионикой, показывают наиболее животрепещущие темы исследований в этой области во всем мире. Однако не стоит затенять существенные ограничения, которые имеют работы, описанные в каждой из трех частей книги. Речь идет о вопросах деонтологического* порядка и этических проблемах, которые ставят некоторые из этих разработок.

Биология и технологии

Технологические изобретения, вдохновленные Природой, переживают бурный взлет, особенно в области нанотехнологий. На самом деле, действенность большинства природных методов, структур и материалов основывается, помимо прочего, на их молекулярной организации. Человек пока очень мало продвинулся в имитации на этом уровне. И предстоит еще понять, как именно организовать структуру и состав многих других ступеней этой иерархии: на уровне органоидов, клеток, живых тканей, органов и т. д. Ведь именно это и является ключом к необычным особенностям творений Природы. Некоторые исследователи, например Джулиан Винсен (*Vincent*) из Центра биомиметики и природных технологий в английском Бате (*Bath*), считают так. Если предположить, что у нас есть инструменты, позволяющие по возможности имитировать биологические

*Деонтология медицинская (греч. *deon*, *deontos* должное, надлежащее + *logos* учение) — совокупность нравственных норм профессионального поведения медицинских работников. — dic.academic.ru

творения, все же мы пока очень далеки от совершенства в этом плане, ибо мы подступаемся к этому, используя фундаментально отличные от природных стратегии.

Вот вам пример. Мы без конца стремимся изобрести новые материалы на основе более чем 350 типов синтетических полимеров, а Природа использует всего два — протеины и полисахариды. В то время как мы стремимся, как правило, создавать гладкие поверхности и абсолютно симметричные структуры, Природа благоволит поверхностям шероховатым и дырявым, а если симметричным, то лишь приблизительно. Мы обычно ищем оптимальное решение какой-то одной проблемы, а Природа предпочитает верные и достаточно хорошие (*«good enough»*) решения, которые одновременно решают сразу множество задач.

Есть и другие качества, которые являет Природа и которые нам следовало бы воспринять. О них говорит «мама» биомимической походки, американка Дженин М. Бениус (*Benyus*) в этом гимне, взятом из ее книги-бестселлера «Биомимикрия — инновации, вдохновленные природой» (*Biomimicry — Innovations inspired by Nature*)¹⁰⁸:

Природа использует солнечную энергию;
Природа использует энергию бережливо;
Природа адаптирует формы к функциям;
Природа все перерабатывает без отходов;
Природа поддерживает кооперацию;
Природа берет в расчет испытания на месте;
Природа ограничивает все крайности;
Природа преобразует напряжения в благие приспособления.

Несомненно, первые два качества особенно противопоставляют инженерные творения творениям Природы. Тогда как мы безудержно расходует энергетические ресурсы полезных ископаемых, сама жизнь прекрасно поддерживается солнечной энергией. Тогда как мы мало заботимся о своих энергетических тратах — потому что, на самом деле, решаем большинство своих технических проблем, лишь увеличивая их, — живые организмы эволюционировали за счет экономии энергии на всех уровнях, структурных и функциональных.

Внимательное изучение природных способов обращения с энергией полезно и необходимо — притом она решает проблемы гораздо более сложные, чем наши. Тем более что наш вид пришел наконец к приоритетам дальнейшего развития.

Биология и робототехника

Аниматы и биоинспирированные роботы тоже пока далеки от поведенческой и энергетической автономии их живых прототипов¹⁰⁹. Однако успехи их применения в различных областях все возрастают — в областях, касающихся освоения окружающего пространства, и при решении таких задач, к которым человек не знает, как подступиться. Они могут помочь в освоении далеких планет, проникать в негостеприимные для человека места, выполняя там свою миссию, или помогать дома. Не стоит совсем пренебрегать и их игровым потенциалом. Интерактивные роботы играют с детьми (и, конечно, взрослыми), и даже появились спектакли, где роботы и актеры обмениваются репликами.

Некоторые другие их применения могут иметь более спорные последствия. Исходя из этого, многие страны оговаривают в документах этические моменты робототехнических разработок. После первого Международного симпозиума по *Роботике* (отныне это признанный термин), организованного в 2004 году в Италии, европейская сеть *EURON* (*EUropean RObotics research Network*) создала в 2005 году мастерскую, включающую исследователей, намеренных учредить «путевой лист» для законодателей¹¹⁰. Участники этой мастерской ссылаются на многие тексты, старые и недавние. Например, на Всемирную декларацию прав человека (1948), Руководство для ученых и исследователей (Организация во имя кооперации и экономического развития, 1994), декларация о науках и применении научных знаний (ЮНЕСКО, 1999) и Хартия Европейского Союза об основополагающих правах (Европейский парламент, 2000). Однако участники мастерской выносят преждевременные суждения о будущем проявлении у машин специфически человеческих качеств, таких

как сознание, свободная воля, человеческое достоинство. Они стараются очень рационально составить список существующих роботов, а также преимуществ и проблем, которые с ними связаны. Затем эта команда по проблемам этики предполагает выпустить рекомендации применительно к конкретным категориям искусственных созданий, таким как: гуманоиды, промышленные роботы, военные роботы; виртуальные роботы; обучающие роботы и развлекательные. Главное, на чем они особенно настаивают, — необходимость «побуждать общественное мнение направлять всеобщее внимание на проблемы робоэтики».

В 2004 году Япония дотировала «Руководство по обеспечению безопасности при использовании будущих поколений роботов». Аналогичный устав разрабатывает с 2007 года Южная Корея, поскольку эта страна следует амбициозной программе: ввести в каждый семейный очаг к 2020 году робототехнического компаньона, который будет развлекать, обучать, защищать и помогать в хозяйственных делах. Стремясь предупредить «вредоносные последствия», министр торговли, индустрии и энергетики Южной Кореи созвал комитет, состоящий из экспертов робототехников, научных и литературных футурологов, чтобы вынести решение о роли и назначениях роботов, «способных в ближайшее будущее развить большой интеллект». В целях современной адаптации знаменитых трех законов робототехники¹¹¹ Айзека Азимова* и требования отслеживаемости (*traçabilité*) решений и действий каждой машины советники намерены включить в этот устав несколько статей, предусматривающих различные социальные последствия.

Некоторые намерения поборников робоэтики кажутся особенно примечательными. Например, ходатайства о возможности разрешения браков между роботами и людьми! (Интересно, все роботы будут иметь равные права запрашивать разрешение на брак?)

*Трем Законам, а также возможным причинам и следствиям их нарушения посвящен цикл рассказов Азимова о роботах. В некоторых из них, наоборот, рассматриваются непредвиденные последствия соблюдения роботами Трех Законов (например, «Зеркальное отражение»). Три закона робототехники — объединяющая тема для всей фантастики Азимова, включая не только цикл о роботах, но и некоторые другие произведения. — <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

В рамках этой эмоциональной темы ставится и более серьезный вопрос: какие чувства будут испытывать люди, взаимодействуя с каким-то там гуманоидом? Ответ не так прост. В статье, опубликованной в 1970 году, японский робототехник Масахиро Мори (*Masahiro Mori*) описал эффект, который называют «загадочная долина*», или «сверхъестественная долина»¹¹². Это перевод с немецкого «*Das Unheimliche*» («Зловещее») — фрейдовского термина, подразумевающего следующее. Если объект кажется нам одновременно знакомым и странным, он порождает интенсивное чувство тревоги. Мори[†] предлагает для описания этого чувства теоретическую кривую[‡], где данному чувству соответствует провал в графике нашей симпатии по отношению к роботам, когда те выглядят «почти как люди». И напротив, когда они явственно отличаются от человека (как описанные нами в этой книге Эбо и *Kismet*) или же если робот очень похож на человека (как *Repliee Q2* — «клон» копирующий внешность женщины-диктора японского телевидения), то наши чувства по отношению к ним — абсолютно позитивные.

Этот теоретический курьез пытаются объяснить некоторые биологи. Они выдвигают гипотезу, что наш мозг в процессе эволюции приобрел потребность определять в человеческой внешности элементы, свидетельствующие о «добром здравии» нашего визави. А робот, который «почти как человек», посылает нам сигналы своей

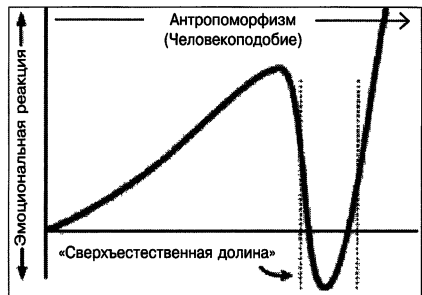
*В русскоязычной Википедии термин переводят как «зловещая долина». Вот цитата оттуда: «Эффект “зловещей долины”» (англ. *uncanny valley*) — гипотеза, по которой робот или другой объект, выглядящий или действующий примерно как человек (но не точно так, как настоящий), вызывает неприязнь и отвращение у людей-наблюдателей. — Прим. перев. по: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

[†]В 1978 году Масахиро Мори провел опрос, исследуя эмоциональную реакцию людей на внешний вид роботов. Поначалу результаты были предсказуемыми: чем больше робот похож на человека, тем симпатичнее он кажется — но лишь до определенного предела. Наиболее человекоподобные роботы неожиданно оказались неприятны людям из-за мелких несоответствий реальности, вызывающих чувство дискомфорта и страха. Неожиданный спад на графике «симпатии» и был назван «зловещей долиной», притом Масахиро Мори обнаружил, что анимация усиливает и позитивное, и негативное восприятие. — <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

[‡]Эта кривая с очень подробным описанием на русском есть на упомянутом выше ресурсе. — Прим. перев.

ненормальности*, которые неприятны для наблюдателя. Например, когда такой андроид не имеет глаз или не выражает никаких эмоций. Правда, другие исследователи считают эту теорию (и это объяснение) псевдонаучной, аргументируя это тем, что она не была обоснована контролируруемыми экспериментами и что просто машины всех сортов вызывают у людей всю гамму эмоций, независимо от того, гуманоидная у них внешность или нет!

Рис. 1. Кривая эмоционального восприятия с провалом «зловещей долины» (по Masahiro Mori)



Другие ученые склонны выделять культурные аспекты нашего отношения к роботам — в свете культурологического подхода. Ссылаются на очень распространенную сейчас идею существенной разницы между так называемым Западным и Восточным взглядом на мир. Одни люди склонны всегда искать отличия человека от машины, тогда как другие вообще не ставят такого вопроса¹¹³. Для «западного» человека новый робот, который все больше и больше становится похожим на человека, приближается к опасной границе, которую запрещено пересекать. К тому же это увеличивающееся сходство убеждает его в превосходстве машины. Для человека «восточного» тот же робот предназначен лишь занимать свое место робота, и притом выполнять свои робототехнические функции максимально успешно — так же эффективно, как человек, или еще лучше. Эти две противопоставляемые философии подкрепляются художественными и литературными произведениями по обе стороны

* А точнее сигналы о том, что мы имеем дело с чем-то непонятным, выходящим за пределы «естественного» и «нормального», то есть имеем дело со «сверхъестественным». — *Прим. перев.*

Босфора. Ужасные создания: Голем, Франкенштейн и Метрополис — творения западного берега. А симпатичные *Tetsuwan Atomu* (Астробой), Мазингер Зет (его эквивалент — *Goldorac*) и тамагочи* — другого берега¹¹⁴.

Несомненно, именно по этой причине восточным роботам, как правило, предназначают роль настоящих компаньонов пожилых людей или людей с физическими трудностями, тогда как западных ограничивают лишь выполнением необходимых задач, без установления особенных уз с человеком. Таким образом, наши будущие домашние роботы будут всегда принадлежать к сфере услуг...

По той же причине возникло мнение, характерное для популярной западной прессы и широкой публики в отношении аниматоров — будто эти роботы-животные нацелены на повышение своей автономии. И такое мнение тоже порождает страхи. Могут ли роботы действительно представлять опасность, если однажды возьмут в руки управление собственной судьбой? Вероятно, *могут* — если они были созданы во вредоносных целях. И, скорее всего, *не могут*, если их роль — лишь помогать человеку решать трудные и опасные для него задачи.

Этот ответ приложим ко всем прикладным научно-исследовательским разработкам. Определенные радиоактивные вещества используют в ядерной медицине во благо, однако те же вещества могут стать причиной гибели миллионов живых существ; лабораторные культуры бактерий применяют в терапевтических целях, но те же бактерии могут распространиться среди населения, рискуя вызвать массовую гибель людей. Биоинспирированная робототехника приносит ни больше и не меньше рисков, чем другие практические приложения науки в иных областях. И мы, конечно, не станем поддерживать мнение некоторых псевдоученых, предсказывающих (ради банальной популярности) уничтожение человеческого вида этими искусственными созданиями.

*Тамагочи (яп. たまごっち тамаготти (нескл.)) — виртуальный домашний питомец. Идея принадлежала компании *Bandai* — третьему по величине игрушечному гиганту планеты. — ru.wikipedia.org/wiki/

Органическое и неорганическое

Разработки в области гибридов живых и искусственных систем в широком смысле не порождают никаких новых уставов, ибо эти разработки отныне и впредь подпадают под законы, регулирующие эксперименты с участием живых организмов. Однако некоторые ратуют за подкрепление правил на бумаге. В частности, чтобы гарантировать долговременность и эффективность предлагаемых гибридизаций: будь они на благо роботов или живых организмов, включая человека. Одна недавняя книга¹¹⁵ устанавливает, к тому же, этический водораздел между человеком «восстановленным» и «измененным» (трансформированным), с одной стороны, и человеком «улучшенным» — с другой. Этот последний понимается как изъявивший желание выйти за пределы человеческой нормы с помощью электронных и технических средств. Такой подход рискует привести к разделению людей на «сверхчеловеков» и «недочеловеков» — в зависимости от денег, которые они могут вложить в свою футуристическую экипировку.

Подобная дилемма уже недавно привлекла внимание в связи со случаем Оскара Писториуса (*Pistorius*) — южно-африканского атлета, родившегося без малых берцовых костей. В возрасте 11 месяцев ему ампутировали ноги, а затем он носил два пассивных протеза из углеродистого волокна. После того как он достиг впечатляющих результатов на соревнованиях по бегу для людей с ограниченными возможностями, он смог финишировать вторым в забеге на 400 м, соревнуясь уже со здоровыми спортсменами на чемпионате Южной Африки. И притом заявил о своем намерении участвовать в Олимпийских играх в Пекине, в 2008 году. Международная федерация атлетизма отказывает ему в этом, ссылаясь на медицинскую экспертизу, обнаружившую, что он передвигается посредством протезов. Эксперты апеллируют к статье регламента за номером 144-2, утверждающей, что спортсмен не имеет право использовать «любое техническое устройство, включая рессоры, колеса и другие элементы, которые облегчают способ передвижения спортсмена, по отношению к тем, кто этого не использует». В то же время Федерация

признает свою растерянность перед проблемой такого рода, считая, что данный случай выходит за рамки всех классификаций, поскольку участие этого спортсмена в Параолимпийских играх представляется еще менее уместным.

В сфере электронных наночипов, которые способны компенсировать сенсорные и моторные недостатки и следить за состоянием наших внутренних органов, а также управлять диспенсером медикаментов — перспективы могут быть значительными. В настоящее время большинство чипов имеют размеры от 10 до 100 мкм (микрон — миллионная доля метра). Для сравнения: средний диаметр наших красных кровяных телец — 7 микрометров¹¹⁶. И уже появляются другие наночипы размером лишь несколько десятков нанометров (миллиардная доля метра). Однако более впечатляющая революция происходит в выборе составляющих чипы материалов — вытеснившая кремний ради использования веществ, к которым организм более толерантен. И эта революция касается также способа построения искусственных устройств — методом самоподобия, по примеру молекул живого организма*.

Ручаемся, что работа этических комитетов будущего переключится на водораздел, который знаменует границу между *Человеком органическим* и *Человеком мехатронным* (*mécatronique*). Надо ли определять эту границу в количественном смысле, например по составу тела протеза — из углерода он или кремния? Или качественно, задавшись вопросом, в какой момент нейропротез начинает слишком угрожать целостности человеческого существа и его личности?

Перспективы?

Родней Брукс (*Brooks*) — один из пионеров биоинспирированной робототехники, уже неоднократно упоминавшийся в этой работе, недавно афишировал четыре фундаментальных этапа, которые надо преодолеть в будущем, чтобы расширить автономию роботов. Во-первых,

*Молекулы этих веществ способны к самосборке по примеру молекул живого организма. — *Прим. ред.*

распознавание объектов на уровне ребенка двух лет, затем понимание языка на уровне четырехлетнего ребенка, потом ловкость рук ребенка шести лет, наконец, социальные представления ребенка восьми лет. Человеку, который спросил его, за какое время, по его мнению, можно достичь этих целей, он ответил: «О, вы, должно быть, журналист... Я никогда не отвечаю на такой вопрос, потому что в 1966 году, обратите внимание, робототехники полагали, что за три месяца преодолеют первый этап. Вот такого рода предсказание было дано отцом-основателем искусственного интеллекта. Кроме того, еще в 1956 году исследователи были убеждены, что человеческий разум удастся воспроизвести через несколько лет...»

Каламбур Брукса, на самом деле, можно приложить ко всем исследованиям в сфере бионики. Все то, что нам видится простым, очевидным и хитроумным в творениях Природы — результат постепенного развития на протяжении чуть более трех миллиардов лет. С нашим гениальным мозгом вида *Homo sapiens*, который, однако, существует всего около сотни тысяч лет, и используя технику, прогресс которой начался всего несколько десятилетий назад, достаточно ли мы оснащены практически и интеллектуально для достижения обсуждаемого уровня совершенства?

Пренебрегая этой осторожностью ученых, несколько сотрудников департамента футурологии *British Telecom* изложили свои прогнозы на ближайшее будущее, то есть на ближайшие 50 лет. Вот несколько перспектив, которые они нам обещают:

- между 2006 и 2010 годами игрушки будут выражать эмоции и воспринимать эмоции своих владельцев;
- между 2008 и 2012 годами восприимчивые ткани смогут измерять частоту наших сердечных сокращений, температуру и оценивать наше состояние и соответственно уточнять освещение и температурный режим нашего жилища;
- между 2011 и 2015 годами в автомобилях с автоматическим управлением будут задействована спутниковая навигация, и они будут снабжены сенсорами, способными остановить машину в случае какой-либо угрозы;

- между 2013 и 2017 годами роботы заменят собак-поводырей для слепых;
- между 2016 и 2020 годами будут утверждены права, защищающие роботов-гибридов с природными органами; благодаря устройствам, управляющим эмоциями (подавляющим гнев и стимулирующим позитивные чувства), криминальная деятельность исчезнет;
- между 2031 и 2035 годами компьютеры станут умнее людей (исследователи не уточняют о каком именно уме идет речь...);
- до 2051 года, наши чувства, мысли, а также нашу память можно будет передавать через компьютер, достигнув тем самым своего рода цифровой безнравственности (*immoralité*) и возможности дистанционно «загрузить» другого человека этой информацией.

Добавим к этому нижеследующее предсказание, принадлежащее Дэниэлу Паули (*Pauly*), директору *Fisheries Centre* университета Британской Колумбии — одного из «пятидесяти самых блестящих ученых мира», который изложил свою футурологическую точку зрения в журнале *NewScientist*, в номере, выпущенном к 50-й годовщине журнала.

«Благодаря устройству, которое сможет читать эмоции, чувства и мысли животного история “Экстравагантного доктора Долиттла”¹¹⁷ станет реальностью. Сначала мы сможем разговаривать только с приматами, потом со всеми млекопитающими и — почему бы и нет — с другими позвоночными, вроде рыб. Это отвратит нас от употребления их в качестве пищи, и мы все станем вегетарианцами!»

Вегетарианцами?! По-видимому, устройство, претендующее на выражение эмоций растений, не стоит пока на повестке дня...

Эпилог

«Чтобы задавать вопросы, нужны двое: тот, кто спрашивает, и тот, кого спрашивают. Будучи вплетенным в природу, животное не может вопрошать. [...] Животное действует вместе с природой. Человек раздваивается. [...] Противоестественные животные — вот кто мы есть», — написал Веркóр* полвека назад¹¹⁸.

Задавать вопросы Природе — прерогатива нашего вида. Надеемся, что эта книга будет побуждать людей не отказывать себе в этом...

*Веркóр (*Vercors*) наст. имя Жан Марсель Брюллер (*Jean Marcel Bruller*; 26 февраля 1902 — 10 июня 1991) — французский писатель, художник-иллюстратор. — ru.wikipedia.org

Благодарности

Мы хотим горячо поблагодарить коллег, которые согласились перечитать некоторые параграфы и главы с тем, чтобы выявить неизбежные опечатки, неточности и места, сложные для понимания.

Мы также очень признательны всем тем, кто уделил свое время поиску источников и иллюстраций, которые мы пожелали включить в эту работу.

И выражаем большую признательность Жеан Соле (*Solé*), которая позволила нам разместить на обложке одну из прекрасных иллюстраций, отныне ставшую эмблемой направления бионики, связанного с аниматами.

Нашу особую благодарность адресуем исследователям: *Angelo Arleo, Kellar Autumn, Wilhelm Barthlott, Serge Berthier, Aude Billard, Julie Blackburn, Rodney Brooks, Roberto Cordeschi, Thomas DeMarse, Dennis Dollens, Stéphane Doncieux, Kenji Doya, Cyrille Foasso, Stéphanie Georget, Benoît Girard, Stanislav Gorb, Rex Graham, Owen Holland, Ioannis Ieropoulos, Auke Jan Ijspeert, Caroline Junier, Frédéric Kaplan, Mehdi Khamassi, Jacqueline Koeppen, Francis Lara, Jacques Maigret, Chris Melhuish, Alain Mercier, Christophe Meyer, Robert Michelson, Xavier de Montfort, Francesco Mondada, René Motro, Jean-Baptiste Mouret, Naohisa Nagaya, Rolf Pfeifer, Giulio Sandini, Kim Sangbae, Isabelle Taillebourg, Henri Van Damme, Stuart Wilkinson...*

...а также всем другим животным и растениям этой планеты, которые заключают в себе источник столь гениальных решений.

Литература

- AYERS, J., DAVIS, J. et RUDOLPH, A. (2002). *Neurotechnology for biomimetic robots*. The MIT Press.
- AYLETT, R. (2004) *Robots. Des machines intelligentes et vivantes?* Solar
- BAR-COHEN, Y. et BREAZEAL, C. (2003). *Biologically Inspired Intelligent Robots*. Spie Press.
- BONABEAU, E. et THERAULAZ, G. (1994). *Intelligence collective*, Hermès Sciences Publication.
- BERTHIER, S. (2000). *Les couleurs des papillons, ou l'impérative beauté*, Springer-Verlag France, Paris.
- BENYUS, J. (2002). *Biomimicry — Innovations inspired by Nature*. USA: Perennial.
- CHANGEUX, J.-P. (Ed.) (2007). *L'Homme artificiel*. Odile Jacob.
- CHAPUIS, A. et GÉLIS, E. (1984). *Le Monde des Automates*. Editions Slotkine.
- COIFFET, P. (1993) *Robot habilis, robot sapiens: Histoire, développements, et futurs de la robotique*. Hermès.
- COINEAU, Y. et KRESLING, B. (1992). *Les inventions de la nature et la bionique*. Hachette Littérature.
- CORDESCHI, R. (2002). *The Discovery of the Artificial : Behavior, Mind and Machines Before and Beyond Cybernetics*. Kluwer.
- DELBEKE, J. (2004) *Des prothèses pour le cerveau*. Le Pommier.
- DREXLER, E. (2005). *Engins de Création. L'avènement des nanotechnologies*. Vuibert.

- DUCROCQ, A. (1953). *L'ère des robots*. Julliard.
- FIEVET, C. (2002). *Les robots*. Que sais-je.
- GANASCIA, J.G. (2007) *l'Intelligence artificielle*, Le Cavalier Bleu.
- GEARY, J. (2002). *The Body Electric: An Anatomy of the New Bionic Senses*. Rutgers University Press.
- GELIN, R. (2006). *Le robot, ami ou ennemi?* Le Pommier.
- GÉRARDIN, L. (1968). *La bionique*, Hachette.
- GUILLOT, A. (2003). Les robots. In Wilgenbus, Salviat, Jamous, et Julia, (Eds). *Graines de Sciences* 5, pp 31-55. Le Pommier.
- GUILLOT, A. (2005). La bionique. In Jamous et Saltiel (Eds), *Graines de Sciences* 7, p. 93-118. Le Pommier
- GUILLOT, A. et MEYER, J.-A. (2002). Psikharpax ou l'ambition d'être un rat. *La Recherche, Numéro spécial: Les nouveaux robots*, 350:64-67.
- GUILLOT, A. et MEYER, J.-A. (2004). *Des robots doués de vie?* Le Pommier.
- HEUDIN, J.-C. (2008). *Les créatures artificielles*. Des automates aux mondes virtuels. Odile Jacob.
- ICHBIAH D. (2005). *Robots: Genèse d'un peuple artificiel*. Éditions Minerva.
- JANGO-COHEN, J. (2006). *Bionics*. Lerner Publications.
- JOHNSON, F. (2006). *The Bionic Human: Health Promotion for People with Implanted Prosthetic Devices*. Humana Press.
- KAPLAN, F. (2001), *La naissance d'une langue chez les robots*, Hermes Science Publications.
- KAPLAN, F. (2005), Les machines apprivoisées: comprendre les robots de loisir, Vuibert.
- KAPLAN, F. et OUDEYER, P.-Y. (2006) *Un robot curieux*, Pour La Science, 348, p. 32-39.

- KEMPF, H. (1998). *La Révolution biolithique: Humains artificiels et machines animées*. Albin Michel.
- DE PRACONTAL, M. (2002). *L'Homme artificiel: Golems, robots, clones, cyborgs*. Denoël.
- DE LATIL, P. (1953). *La Pensée Artificielle*, Gallimard, Paris.
- LEGUAY, C. (2005) *Les robots, une histoire de la robotique*. Éditions IMHO et Chantal Leguay.
- LUZEAUX, D. et PUIG, T. (2007), *À la conquête du nanomonde. Nanotechnologies et microsystèmes*, Éditions du Félin.
- MENZEL, P. et D'ALUISIO, F. (2001). *Robo sapiens: une espèce en voie d'apparition*. Autrement.
- MEYER, J.A. (1970). *La bionique*. In *La Biologie II*. Éditions CAL.
- MEYER, J.-A. et GUILLOT, A. (2001). La robotique évolutionniste. *Pour la Science*, 284:70-77.
- MEYER, J.-A. et GUILLOT, A. (2002). Vers une robotique animale. *Pour la Science*, 300:168-171.
- MEYER, J.-A. et GUILLOT, A. (2008). Biologically inspired robots. In Siciliano, B. and Khalib, O. (Ed). *Handbook of Robotics*, Springer, Berlin.
- MOURET, J.-B. (2005). Concepts fondamentaux des algorithmes évolutionnistes. *Linux Magazine France*, p. 34-41.
- MOURET, J.-B. (2005). Algorithmes évolutionnistes: évolution artificielle de créatures. *Linux Magazine France*, 42-49.
- NACHTIGALL, W. (2003). *La nature réinventée*. Plon.
- PERKOWITZ, S. (2004). *Digital People: From Bionic Humans to Androids*. Joseph Henry Press.
- RENNARD, J.-P. (2002) *Vie artificielle. Où la biologie rencontre l'informatique*. Vuibert.

- DE ROSNAY, J. (2007). *2020: Les Scénarios du futur: Comprendre le monde qui vient*. Des Idées & des Hommes.
- THERAULAZ, G. (Ed). (1997). *Autoorganisation et comportement*, Hermès.
- WEBB, B. and CONSI, T. (2001). *Biorobotics. Methods and Applications*. American association for Artificial Intelligence.
- WOOD, G. (2005). *Le rêve de l'Homme-Machine. De l'automate à l'andronde*. Autrement.

Примечания

1. (стр. 10) Происхождение самого термина связывают с личностью майора медицинских войск военно-воздушных сил США Джека Е. Стила (*Steele*), который был одним из инициаторов этого конгресса.
2. (стр. 17) *Olivier RAZAC. Histoire politique du barbelé: La prairie, la tranchée, le camp. Éditions La Fabrique, Paris, 2000.*
3. (стр. 19) Речь идет о так называемом «кембрийском взрыве», случившемся 600 миллионов лет назад.
4. (стр. 26) В частности, немцы Фрей Отто, Карл Цейс и Хайнц Ислер.
5. (стр. 26) Чем больше этот коэффициент приближается к «1», тем большее сопротивление на машину оказывает встречный поток воздуха. Например: *Шевроле 2 CV* имеет коэффициент 0,52, а Мерседес-Бенц S 320 CDI — коэффициент 0,26...
6. (стр. 26) По инициативе швейцарского инженера Кони Шатрот (*Koni Schatrotth*).
7. (стр. 27) Рудольф Баннаш (*Bannasch*) и группа его сотрудников.
8. (стр. 35) Проект задуман архитектором Слоаном Кульпером (*Sloan Kulper*).
9. (стр. 39) Эндрю Р. Паркер (*Parker*) и Крис Лоуренс (*Lawrence*).
10. (стр. 39) Группа Робера Коэна (*Cohen*) и Мишеля Рубне (*Rubner*).
11. (стр. 40) Жозе Бико (*Bico*) из Лаборатории гидродинамики и физической механики *ESPCI*.
12. (стр. 48) Роберт Фул (*Full*) и Келлар Отумн (*Autumn*). Кроме того, был приглашен к сотрудничеству Константино Кретон (*Creton*) — исследователь из парижского *ESPCI*.

13. (стр. 50) Заметим, что совсем недавно исследователи из Эванстонского (*Evanston*) университета в Иллинойсе создали «геккель» (помесь «геккона» с «мидией») — материал, предназначенный для покрытия липких лент, который можно использовать под водой. Он содержит наноструктуры по методу геккона, а также адгезив, который устойчив в воде (и который будет вопросом следующей главы): клей вырабатываемый голубой мидией.
14. (стр. 52) Поль Ротмунд (*Paul Rothmund*).
15. (стр. 53) Работа Сержа Бертье «Цвета бабочек, или императив красоты» — *Serge BERTHIER. Les couleurs des papillons, ou l'impérative beauté. Springer-Verlag France, Paris, 2000.*
16. (стр. 56) Том Эйсн (*Eisn*) и Энди Макинтош (*McIntosh*).
17. (стр. 57) Рудольф Баннаш (*Rudolf Bannash*) и Константин Кебкал (*Kebkal*).
18. (стр. 61) От греческого *argyros* — серебряный и *nein* — прясть.
19. (стр. 61) Церман (*Cerman Zdenek*).
20. (стр. 61) *Jean-Henri FABRE. Souvenirs entomologiques. IXe Série, Chapitre 15, 1905.*
21. (стр. 65) Кайчанг Ли (*Kaichang Li*).
22. (стр. 68) Давид Л. Каплан (*Kaplan*).
23. (стр. 69) Этой группой руководит Паула Т. Хэммонд (*Hammond*).
24. (стр. 70) Мы можем так или иначе сгибать и наклонять свою спину 720 000 раз в час, не испытывая при этом усталости. . .
25. (стр. 72) Маркус Решбергер (*Rechberger*) и Юрген Бертлинг (*Bertling*).
26. (стр. 73) Группа Кеннета Векчио (*Vecchio*).

27. (стр. 77) «То, что, по преданию, придумал и смастерил Архит-пифагореец, должно считаться не менее удивительным, равно как и не лишенным смысла. Многие известные греческие писатели, включая ревностного изыскателя старины — философа Фаворина*, с полной уверенностью пишут, что подобие голубя, изготовленное Архитом из дерева по законам науки механики, летало: оно держалось на весу благодаря противовесам [?] [или: «благодаря равновесию», *libramentis*] и приводилось в движение заключенным внутри [него] и невидимым воздухом». Это настолько невероятно, что хотелось бы привести слова самого Фаворина: «Архит Тарентский, искусленный помимо прочего в механике, сделал летающего деревянного голубя, который, однажды сев, уж больше не взлетал. Ибо до тех пор * * * он мог летать, пока...» — *Авл Геллий, «Аттические ночи»*[†].
28. (стр. 82) *Alfred CHAPUIS et Édouard GÉLIS (1984). Le Monde des Automates. Éditions Slatkine, Genève, 1984.*
29. (стр. 83) В Музее искусств и истории Нёвшателя (*Neuchâtel*, Швейцария) их можно еще увидеть в действии.
30. (стр. 85) Чувствительные рецепторы, которые воспринимают внешние и внутренние стимулы, биологи разделяют соответственно на «экстерорецепцию» — эти рецепторы восприни-

*Фаворин (Φαβρίνιος) из Арелаты (нач. II в. н.э.) — греческий ритор и философ, близкий традиции академического скепсиса. — *По материалам Интернета.*

[†]Авл Геллий (лат. *Aulus Gellius*; ок. 130–180) — древнеримский писатель и филолог. Любитель древностей и представитель архаизирующего направления латинской литературы II века. «Аттические ночи» в 20 книгах (лат. «*Noctes Atticae*») — единственное произведение Авла Геллия. Выпущены в свет около 180 года. Название связано с тем, что автор посвящал работе над произведением долгие зимние вечера. «Аттические ночи» сохранились почти целиком. (<http://ru.wikipedia.org/wiki/>) Здесь приведен перевод фрагмента, на который ссылаются авторы, по отечественному изданию: «*Фрагменты ранних греческих философов*» / Составитель А.В. Лебедев. М., 1989. (Орфография сохранена: многоточия, скобки и звездочки означают пропуски и неясные, либо утраченные, места в дошедшем до нас тексте Геллия.) — *Прим. перев.*

мают ощущения из внешнего окружения, а также «проприорецепцию» и «интерорецепцию» — связанные с движениями тела, сосудистыми реакциями и другими внутренними телесными ощущениями.

31. (стр. 85) Электричество известно с 1813 года.
32. (стр. 86) К счастью, их следы все же сохранились благодаря книге Роберто Кордеши (*Cordeshi*), появившейся в 2002 году: *The Discovery of the Artificial: Behavior, Mind and Machines Before and Beyond Cybernetics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
33. (стр. 87) Norbert WIENER. *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, 1948.
34. (стр. 92) Albert DUCROCQ. *L'ère des robots*. Julliard, Paris, 1953.
35. (стр. 94) Newell и Simon (1953).
36. (стр. 94) Головоломка Ханойские башни (*Tours de Hanoï*) — это игра на соображение, которую придумал французский математик Эдуард Люка (*Édouard Lucas*). Она состоит в том, чтобы разложить диски разных диаметров из «стартовой» башни в «финишную», пройдя через «промежуточную башню» — и все это надо проделать с минимумом ходов и по следующим правилам: (1) за один ход можно перекладывать только один диск; (2) диск можно перекладывать только на другой диск большего размера либо на пустое место. Предполагается, что это последнее правило распространяется равным образом на конфигурацию первой, стартовой башни.
37. (стр. 94) Lindsay et al. (1967), Buchanan et Shortliffe (1974).
38. (стр. 94) Joseph Weizenbaum (1965).
39. (стр. 95) Hubert DREYFUS. *What computers can't do: The limits of Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, 1972. См. также: Hubert DREYFUS. *What computers still can't do: A critic of Artificial Reason*. The MIT Press, Cambridge, 1992.

40. (стр. 98) Примечательно, что автоматический англо-французский переводчик этой фразы в Интернете выдает: «*Le bidon a peut mettre en boîte peut*» («Бидон может поставить на ящик может»). Это еще раз демонстрирует, насколько искусственный разум увязает в деталях, не видя за деревьями леса (общего смысла)!
41. (стр. 100) Первая национальная конференция, объединившая исследователей в этой области, «Симуляция адаптивного поведения: от животных к аниматам» («*Simulation of Adaptive Behavior (SAB): From animals to animats*») была организована в Париже в 1990 году и впредь созывается каждые два года в Европе и в других частях света.
42. (стр. 101) *Michael GROSS. La vie excentrique. Éditions Belin, Pour la science, 2003.*
43. (стр. 102) С тех пор прошло примерно 400 миллионов лет.
44. (стр. 104) Руководитель группы Джон Х. Лонг (*H. Long*).
45. (стр. 104) Буквально это слово означает «родственники ящерицы».
46. (стр. 105) Джиндонг Лиу (*Liu*) и Хуошэнг Ху (*Huosheng Hu*).
47. (стр. 108) Холк Крус (*Holk Kruse*).
48. (стр. 111) Произносится «Ашимо».
49. (стр. 113) Группа, руководимая Джеймсом ДеЛорье (*DeLaurier*).
50. (стр. 114) Робертом Михельсоном (*Michelson*) и его группой.
51. (стр. 117) Термин «навигация» не относится исключительно к морским механизмам. Он описывает все, что относится к местоположению, ориентации и перемещению любой системы, будь она природная или искусственная.
52. (стр. 117) Группа, руководимая Николя Францешини (*Franceschini*).

53. (стр. 118) Ее сетчатка содержит фоторецепторы, которые находятся в глубине всех омматидий глаза мухи.
54. (стр. 118) Другими словами, муха воспринимает последовательный ряд картинок (образов) как прерывистый, если за секунду (по сетчатке) проходит менее 300 таких образов, а человек начинает воспринимать прерывистость, только когда кадры становятся совсем редкими — 25–30 за секунду.
55. (стр. 120) Очень многие насекомые и некоторые птицы воспринимают поляризованный свет. Викинги тоже использовали кордиери* — камень, позволяющий определить положение солнца, наблюдая за изменениями цвета минерала. Дабы узнать, где находится солнце в пасмурную погоду, надо было повернуть камень так, чтобы он стал максимально светлым†. Полагают, что благодаря такой навигации викинги смогли достичь Нового Света и вернуться оттуда домой — задолго до Христофора Колумба.
56. (стр. 125) Франк Грассо (*Grasso*) и Дженифер Базил (*Basil*).
57. (стр. 127) Проект ICEA «*Integrating Cognition, Emotion and Autonomy*», в котором участвовал десяток европейских групп. *Psikharpar* — это имя короля крыс в одной пародии на Илиаду, ошибочно приписываемую Гомеру, под названием «*Batrachomyomachie*».
58. (стр. 141) Эксперимент Рональда Кубе (*Kube*) и Хонг Зханга (*Zhang*).

*Кордиерит (устар. штейнгейлит, дихроит, водяной сапфир, иолит) — коллекционный минерал, алюмосиликат магния и алюминия. Название получил в честь французского горного инженера и геолога Пьера Луи Антуана Кордье (*P. Cordier*; 1777-1861). — <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

†Благодаря свойствам плеохроизма кордиерит использовался мореплавателями для определения положения Солнца при пасмурном небе (т.н. «компас викингов»). В авиации является составной частью поляризационных фильтров, служащих для определения положения Солнца после заката (на основании изменения поляризации голубого цвета в зависимости от направления наблюдения). — там же.

59. (стр. 143) Крейг Рейнолдс (*Craig Reynolds*).
60. (стр. 147) Группа, руководимая Тошио Фукуда (*Toshio Fukuda*).
61. (стр. 154) Группа, руководимая Джакомо Рицоллатти (*Rizzolatti*).
62. (стр. 154) Это важнейшее открытие последних десятилетий малоизвестно, хотя, по мнению директора Калифорнийского университета, его можно сравнить с открытием ДНК. Оно, на самом деле, открывает большие перспективы в изучении языков, в сфере транскультурного переноса и в области социальных взаимодействий.
63. (стр. 158) ... а также многие млекопитающие.
64. (стр. 158) Существование такого пространственного представления у крысы предполагал еще Эдвард Толмен в 1930 году.
65. (стр. 158) Выявлены в 1971 году, находятся преимущественно в гиппокампе.
66. (стр. 158) Открыты в 1984 году в зоне за субикулюмом* (*post-subiculum*), в задней части поясной коры (*cortex rétrosplénial*) и в других структурах мозга, особенно в таламических.
67. (стр. 158) Открыты в 2005 году в медиальной части энторинальной† (*entorhinal*) коры.
68. (стр. 164) Эксперименты Люка Стилса (*Steels*), Фредерика Каплана (*Kaplan*) Пьера-Ива Удейе (*Oudeyer*).
69. (стр. 168) Фредерик Каплан (*Kaplan*) Пьер-Ив Удейе (*Oudeyer*).
70. (стр. 170) Автор использует термин «*Umwelt*».

* Субикулюм — одна из областей гиппокампа. — *Прим. перев.*

† Энторинальная — означает внутренняя обонятельная. Она расположена в центральной части лобных долей больших полушарий мозга. — *Прим. перев.*

71. (стр. 171) Автор использует термин «*Funktionale Tünnung*».
72. (стр. 171) Это английское слово, перешедшее во французский язык, иногда его переводят как «атрибутивность».
73. (стр. 171) В лаборатории, руководимой Родней Бруксом (*Brooks*).
74. (стр. 171) В лаборатории, руководимой Джулио Сандини (*Sandini*).
75. (стр. 174) Антонио Дамасио «Ошибка Декарта» — *Antonio DAMASIO. L'erreur de Descartes. Éditions Odile Jacob, Paris, 1995.*
76. (стр. 175) Группа Синтии Бризил (*Breezeal*).
77. (стр. 180) У живых систем это перекрещивание (*crossing-over*) производится во время организации репродуктивных клеток родителей и соответствует перекрестному наложению отцовских хромосом только между собой, а материнских — между собой. Это не следует путать с перекрещиванием хромосом, происходящих от двух родителей.
78. (стр. 182) Акроним английского термина *Central Pattern Generators*.
79. (стр. 183) Проект назван в честь пилота аэронефа «Альбатрос» — героя книги Жюль Верна «*Robur le Conquérant*» («Робур-завоеватель»). Этим проектом руководит Стефан Донсьё (*Doncieux*).
80. (стр. 188) *Auke-Jan Ijspeert* и *Jean-Marie Cabelguen*.
81. (стр. 190) «Алиса в Зазеркалье» Льюиса Кэролла появилась в 1871 году, вслед за «Алисой в стране чудес».
82. (стр. 191) Группа под руководством Дарио Флореано (*Floreano*).
83. (стр. 194) Это выражение объединяет исследования этологов и психологов, которые считают, что именно в ответ на

сложность социального окружения у приматов необыкновенно развились их когнитивные способности — в том числе искусство ложного информирования других ради собственной выгоды (*Richard BYRNE et Andrew WHITEN, Machiavellian intelligence: social expertise and the evolution of intellect in monkeys, apes and humans. Oxford, Clarendon Press, 1988*).

84. (стр. 194) Группа Кенджи Дойа (*Kenji Doya*).
85. (стр. 195) Координатор этого проекта — Марк Дориго (*Dorigo*).
86. (стр. 197) Проект ведут Ход Липсон (*Lipson*) и Джордан Б. Поллак (*Pollack*).
87. (стр. 210) Агентство Департамента обороны Соединенных Штатов.
88. (стр. 214) Под руководством Томаса ДеМарса (*DeMarse*).
89. (стр. 218) Под руководством Криса Мельхвиша (*Melhuish*).
90. (стр. 221) Туннельный микроскоп разработали Герд Биннинг (*Binnig*) и Хайнрих Рорер (*Heinrich Rohrer*) — тоже получившие Нобелевскую премию.
91. (стр. 221) *Erik DREXLER. Engins de création. L'avènement des nanotechnologies. Vuibert, Paris, 2005*.
92. (стр. 221) Руководитель Карло Монтемагно (*Montemagno*).
93. (стр. 224) *Manfred E. CLYNES et Nathan S. KLINE. «Cyborgs and Space». Astronautics, 1960*.
94. (стр. 225) Координатор Паоло Дарио (*Dario*).
95. (стр. 228) Комбинезон придумал профессор Санкай (*Sankai*) из университета Тсукубы.
96. (стр. 230) Изобретатель Марк Хумайюн (*Humayun*).
97. (стр. 232) Координатор Пьер Рабишон (*Rabischong*).
98. (стр. 235) Руководитель группы Джон Чепин (*Chapin*).

99. (стр. 235) В медиальном пучке конечного мозга.
100. (стр. 238) Координатор проекта — Жан-Луи Денобур (*Deneubourg*) из Свободного университета Брюсселя.
101. (стр. 239) Сказка братьев Гримм, на основе одной германской легенды.
102. (стр. 241) По-английски: *brain-computer* или *brain-machine interfaces* (*BCI* или *BMI*).
103. (стр. 241) Согласно Эберхарду Фетцу (*Fetz*) из Вашингтонского университета.
104. (стр. 243) Этим синдромом страдал Жан-Доминик Боби (*Bauby*) и описал его в книге «Скафандр и бабочка», изданной в Париже в 1997 году: *Le scaphandre et le papillon*, Robert Laffont, Paris, 1997.
105. (стр. 247) Проект координирует Жозе дель Росио Миллан (*Rocio Millán*).
106. (стр. 247) Ниельс Бирбаумер (*Niels Birbaumer*).
107. (стр. 247) Здесь подразумеваются игровые персонажи — участники игровой ситуации в пространстве виртуальной игры.
108. (стр. 251) *Janine M. BENYUS. Biomimicry: Innovation inspired by Nature. Harper Perennial, New York, 2002.*
109. (стр. 252) Несмотря на это *ASPCR* — американская ассоциация «Предотвращения жестокости по отношению к роботам» действительно собирается защищать их права!
110. (стр. 252) На сайте: *www.roboethics.org*.
111. (стр. 253) В книге «Роботы» (1938): «Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред; робот должен повиноваться всем приказам, которые дает человек, кроме тех случаев, когда эти приказы противоречат Первому Закону; Робот должен за-

ботиться о своей безопасности в той мере, в которой это не противоречит Первому и Второму Законам.»

112. (стр. 254) По-английски: «*uncanny valley*» (сверхъестественная долина), по-японски: «*bukimi no tani*».
113. (стр. 255) *Frédéric KAPLAN. Les machines apprivoisées: comprendre les robots de loisir. Vuibert, Paris, 2005.*
114. (стр. 256) См. также статью Филиппа Сессе (*Cesse*), появившуюся в Сети: «*Robots et inconscient collectif*», <http://artslivres.com/ShowArticle.php?Id=497>.
115. (стр. 257) *Joël DE ROSNAY. (2007) 2020. Les scénarios du futur. Des Idées & Des Hommes.*
116. (стр. 258) <http://www.clinchem.org/cgi/content/full/44/9/2008>.
117. (стр. 260) «Экстравагантный доктор Долиттл» — рассказ Хуга Лофтина (*Hugh Loftin*, 1920), где повествуется об одном ученом, который обнаружил, что он может разговаривать с животными.
118. (стр. 261) «Бесчеловечные животные» — роман, написанный в 1952 году и адаптированный для театра под названием «Зоо, или Убийца-филантроп».

Предметный указатель

А

автономия, 153
 в решениях, 126, 217
 энергетическая, 217, 251
Адер, Клемент, 111
Айзек Азимов, 252
аквариум, 104
акула, 40, 41
акустическая камера, 58
алгоритмы генетические, 178
альбатрос, 111, 182
амфибии (или земноводные),
 189
андроид, 77, 78, 252
арагонит, 71
Аризонская башня (*Arizona
Tower*), проект, 33
Архит из Тарента, 76, 267
архитектура поглощения, 133
Аэробус, 41

Б

бабочка, 51
базальные ганглии, 150
бактерии, 255
батареи с микробным горючим,
 217
Бениус (*Benyus*), Дженин М.,
 250

Бигелоу (*Bigelow*), Джулиан,
 87
биоматериалы, 205
бионик кар, 25
бихевиоризм, 83, 146
бихевиористы, 83, 143
блоха, 69
браге, Тихо, 202
брахиация, 146
Брукс, Родней (*Rodney Brooks*),
 257
Брунеллески, Филиппо, 24
Буллман, Ханс, 77
Бэббидж (*Babbage*), Чарльз, 81

В

Ван-дер-Ваальс, 45
вертолет, 118, 220
вибриссы, 124, 234
Винер, Норберт, 86, 87
Виргилий, 75
Витрувий, 20, 30
Вокансон, Жак де, 78
восприятие, 57

Г

Гауди, Антонио, 34
Геккель, 23



геккон, 10, 265

Геминоид (*Geminoid*), 176

Гербер из Орийак (папа Сильвестр II, 75

Геродот, 201

Герон Александрийский, 76

гиббон, 146

Гибсон, Джеймс Дж, 170

говорящая голова, 75

Говорящие Головы (*Talking Heads*), 162

Голланд (*Holland*), Джон, 177

голубь, 76

гомеостаз, 87

гомеостат, 86

горилла, 146

Горилла-Робот III, 146

гуманоид (см. андроид), 252

Д

да Винчи, Леонардо, 30, 78

Дамасио, Антонио, 173

двигатель внутреннего сгорания (модель *combustion-propulsion*), 55

Декарт, Рене, 76

дельфин, 56, 122

Дом лилий («*Lily House*»), 21

Дрейфус, Хуберт (*Hubert*), 93

Дрекслер, Эрик, 220

дрон, 111, 118

Дюкрок, Альбер (*Ducrocq*), 126

Ж

Жак Дро (*Jacquet-Droz*), Пьер и Генри-Луи, 78

Жели (*Gélis*), Эдуар, 81

З

загадочная (или зловещая) долина, 253

зимородок, 26

змея, 106

золотое сечение (золотое число), 27, 29

зона жизнеспособности, 87

И

институт наномедицинских технологий и биологии в Ченгду (*Chengdu*), Китай, 34

интерфейс мозг-компьютер, 240

иризация, 52

искусственная нога, 202

исполнитель, 150

К

Камю, Франсуа-Жозеф де, 77
карп, 104

категоризация, 156

кибер-рука, 8, 224

кибернетика, 9, 86, 87

кислородный катод, 218

кисть (руки) искусственная, 202

клетки (нейроны)



местоположения, 157
направления головы, 157
решетки, 157
когнитивная карта, 157
колибри, 111
колючая проволока, 15
коммуникация, 56, 169, 192,
193
конхиолин, 72
Корбюзье, Шарль-Эдуар, 27
красный моллюск (*orteau*), 71,
115
Кристал Палас (Хрустальный
дворец), 21
крыса, 126, 157, 158, 160, 234
кувшинка (водяная лилия), 20
Кузин (*Cusin*), Шарль, 202
кузнечик, 120
Кусто, Жак, 55

Л

Ламетри, Жюльен Офре де, 78
Ланжевен (*Langevin*), Поль, 16
Ле Бри, Жан-Мари, 111
Лёб (*Loeb*), Жак, 83
Леон Философ, 77
летучая мышь, 111
Лешо, Жан-Фредерик, 82
Лилиенталь (братья), Густав и
Отто, 111
Линденмайер, Аристид, 31
лиса, 87, 89
лотос, 47
лучезарный город, 27
лягушка, 209

М

макаки, 153
МакКалоч (*McCulloch*), Уор-
рен, 86
МакКарти, Джон, 92
Мандельброт, Бенуа, 30
Марс, 112
Мельцель, Иоган Непомук, 77
Ментор, 112
Местраль, Жорж де, 44
метафора мозг-компьютер, 240
мидия, 265
минога, 215
Мински (*Minsky*), Марвин, 92
мира модель собственная, 156
морская выдра, 71
мотивация, 149, 152
мульти-электроды, 240
муравей, 118, 119, 136, 157
муха, 45, 117
мышцы, 84, 125, 204, 209
Мьеснер (*Miessner*), Бенджа-
мин, 84

Н

навигация, 116, 118, 119, 156,
158, 161, 258
нано
зеркала, 53
машины, 220
робот, 220, 221
технологии, 8, 39, 220, 249
чипы, 257

наutilus (моллюск-кораблик),
54

нейроны, 86

зеркальные, 153

разрядные, 132

формальные, 129

О

общий смысл, 96

окислительно-восстановитель-
ный процесс, 217

омар, 123

оптический поток, 117

оса, 115

осьминог, 114

П

Павлов, Иван, 83, 91

Парэ, Амбруаз (*Ambroise*), 202

паук, 60

перламутр, 71

Пиаже, Жан, 170

пингвин, 26, 103

Питтс (*Pitts*), Волтер, 86

Пифагор, 202

подход

аниматы, 129

роботы, 105

полет, 52

планирующий, 185

с машущими крыльями,
111, 182

стационарный, 112

Проект (*Adapter*), 231

Пэкстон, Жозеф, 20

Р

радиолярии, 22

Региомонтанус (*Regiomontanus*),
Иоганнес Мюллер из Кё-
нигсберга, 75

резилин (*resiline*), 68

Реомюр, Рене Антуан Фершо
де, 65

Реомюр, Рене-Антуан Фершо
де, 15

реотаксия, 124

Риколе, Робер, 23

Робота (кукла-робот, 154

робоэтика, 251

Розенбдют, Артуро, 88

Росс, Томас, 85

рука искусственная, 8

Руссель, Бент, 85

рыба-чемодан, 26

С

саламандра, 187

самовосстановление, 199

Сен Илэр (*Hilaire*), Франсуа
Ксавье Бон де, 65

селективное значение (значи-
мость), 178

сетчатка, 230

сеть нейронов (нейронная сеть),
131, 184

система мультиагентная, 136
 скарабей
 жук-бомбардир, 55
 стенокара (*stenocara*), 37
 Скиннер, Буррхус, 83
 складывание (за счет сгибания), 49
 слон, 114
 сова, 57
 солнечная панель, 50
 сонар, 17, 56
 Стефенс, Джон, 85
 Стил (*Steele*), Джек Е., 265
 стрекоза, 59
 схема тела, 171

Т

Толман, Эдвард, 143
 таракан, 129, 132, 133, 135, 136
 Торндайк, Эдвард, 83
 тунец, 102
 Туринг, Алан, 92
 тутовый шелкопряд, 206

У

Уден, Жан-Эжен-Робер, 80
 Уолтер, Уильям Грей, 87
 улитка (уха), 27, 126
 Уотсон, Джон, 83
 утка, 79
 ухо, 57, 71, 223, 230

Ф

Фабр, Жан-Анри, 60

Фейнман (*Feynman*), Ричард, 219
 феромоны, 118, 207, 237
 Фибоначчи, Леонардо Пизанский, 27, 28
 фон Берлихинген (*Berlichingen*), Гёц, 202
 фон Икскюль (*Uexküll*), Якоб, 169
 фон Кемпелен, Вольфганг, 77
 фонотаксия, 120
 фотоны, 45, 50
 фототропизм, 84
 фрактал, 30
 Фэрбус, 111

Х

Халл, Кларк, 143
 Хебб (*Hebb*), Дональд, 131
 хемо-таксис, 135
 хемо-тропотаксия, 123
 Хесистрат (*Hégésistrate d'Elée*), 201
 химотаксия, 208
 хищник-жертва, 190
 Хэммонд (*Hammond*), Джон, 84

Ц

целакант, 104

Ч

Чай-Лун (или Тсай-Лун), 14

черепахи *ELMER, ELSIE, CORA*, 90

Черная королева, 189

чешуйки, 51, 53, 124

чип микрофлюидный, 38

III

Шапюи (*Chapuis*), Альфред, 81

Шеннон (*Shannon*), Клод, 93

Э

Эбо (робот), 164

экзоскелет, 218

экраны iMoD, 53

электро-антеннограмма, 207

электронная лиса, 87

электроэнцефалограмма, 240

эхолокация, 16, 17, 122

Эшби, Уильям Росс (*Ross Ashby*), 86

Я

яйцо, 24

ящерица (см. геккон), 10

A

Adaptive Brain Interface (ABI), 246

AMouse, 125

Argus II, 229, 230

ASIMO, 110

AuRoRa, 154

B

Babybot, 170

BICSAAR (робот), 124

BigDog (робот), 109

Boids, 142

Brachiator III (робот), 146

BrainGate, 241

C

Cog (робот), 170

CPG, центральный генератор паттернов (*Central Pattern Generator*), 181, 188

Cricket Watch, 17

Cyber Rodent (робот), 193

Cyberthèse, 228

Сус, 165

D

Deep Blue, Deep Fritz (программы), 97

Dendral (система), 93

Didabot, дидабот (робот), 137

Direct Brain Interface (проект), 241

E

Ecobot-II (робот), 218, 219

Electric Dog, 84

Eliza, 93

Entomopter, 112

EURON, 251

F

F-22 Raptor, 213
F1-АТФ-аза, 220
Fab Tree Hab, 34
Feelix-growing (проект), 175

G

G9-1, G9-2, G9-3, 104
Gastrobot (робот), 217
General Problem Solver (GPS),
93
Genghis (робот), 135
GOFAL, 145
Golem (проект), 196

H

Hex-o-Spell, 244
HUMAINE, 175
Hybrid Assistive Limb (HAL),
227

I

ICube, 172
InsBot, 237

K

Kismet (робот), 253

L

L-система, 29, 31
Libelle G-Multiplus (комбине-
зон), 59

M

Madeleine (робот), 103
Mobi, 228
Modulor, 31
Multi-Locomotion Robot III
(MLR III) (робот), 148, 187
Mycin (система), 93

O

OCTarm (робот), 114
Octave (робот), 118
OCTOR (проект), 113
Omnitread (робот), 106

P

Periplaneta computatrix (искус-
ственный таракан), 129
Physarum polycephalum (вид
плесени), 211
Plug-In City (проект), 32
Psikharpaх (робот), 126, 127,
149, 151

R

Rabbit (робот), 110
Repliee Q2 (робот), 175
Robo-roach (робот), 232
RoboTuna (робот), 103
Robur (проект), 182
Rodolph (робот), 122
RunBot (робот), 110

S

s-bots (роботы), 191



Т

Sahabot 1 и 2 (роботы), 119
Salamandra robotica (робот),
187
Sect (робот), 180
Shinkansen, 26
Slugbot (робот), 219
Smartfish (самолет), 25, 26
Speedo (плавательный комби-
незон), 41
Sprawlita, Sprawls (роботы),
108
Stickybot (робот), 108
SUAW (*Stand Up And Walk*)
(программа), 231
Swarm-bot (робот), 194

Thought Translation Device (си-
стема), 246

U

UPF-2001, 103

V

VCUUV (машина), 103
Velcro (застежка-репейник), 43
Verichips (фирма), 238

W

Whiskerbot (проект), 125

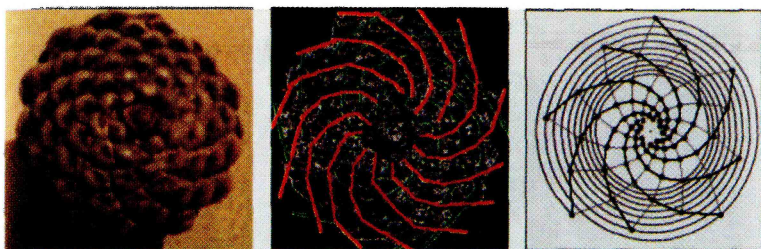


Рис. 2.5 (см. стр. 28)

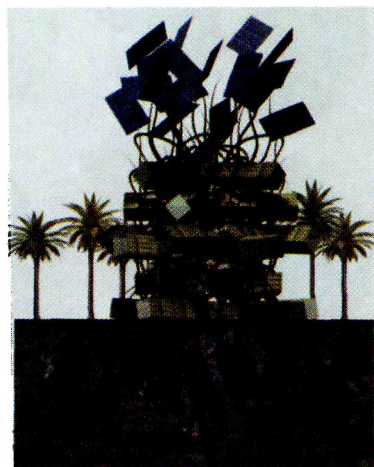


Рис. 2.9 (см. стр. 34)

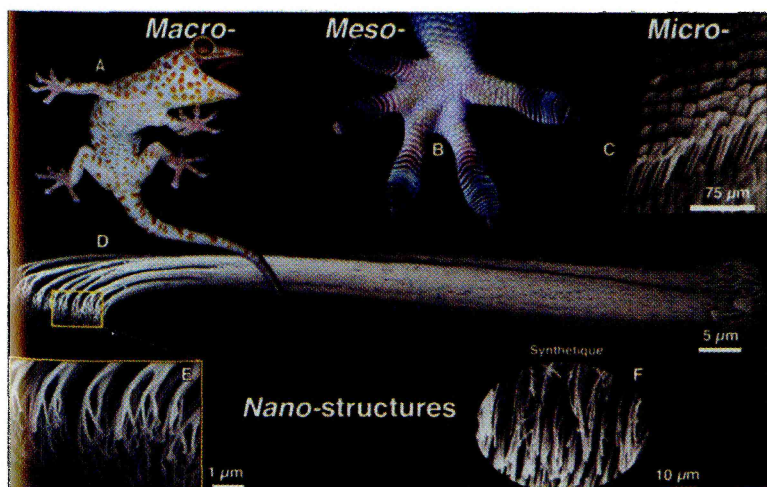


Рис. 3.3 (см. стр. 49)

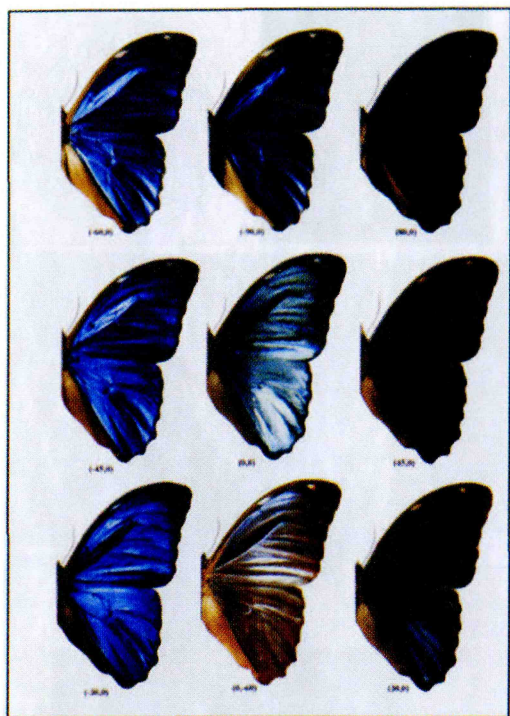


Рис. 3.5 (см. стр. 54)



Рис. 5.4 (см. стр. 83)

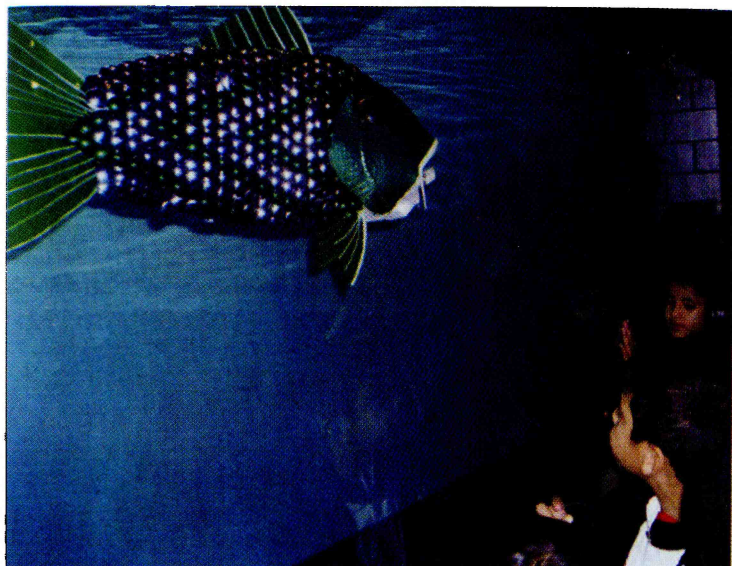


Рис. 6.2 (см. стр. 106)



Рис. 6.5 (см. стр. 110)



Рис. 6.8 (см. стр. 113)

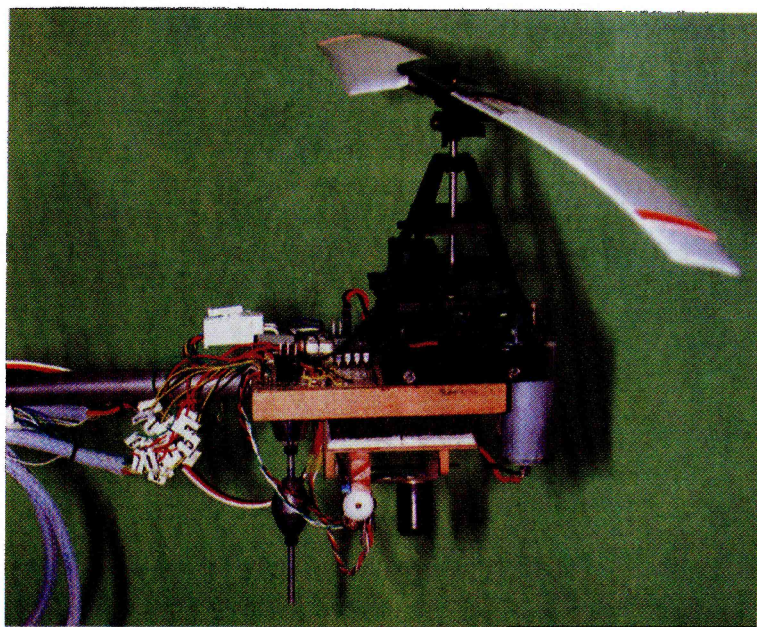


Рис. 7.1 (см. стр. 118)

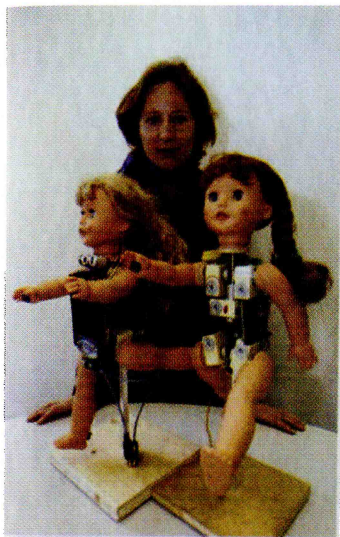


Рис. 9.3 (см. стр. 156)



Рис. 9.7 (см. стр. 165)

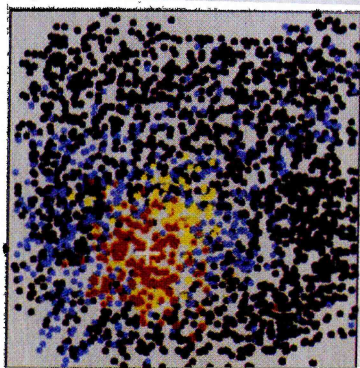
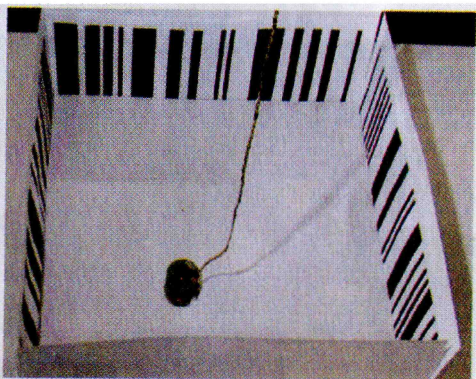
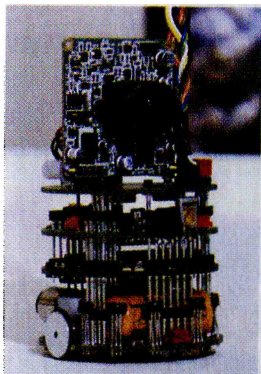


Рис. 9.5 (см. стр. 162)

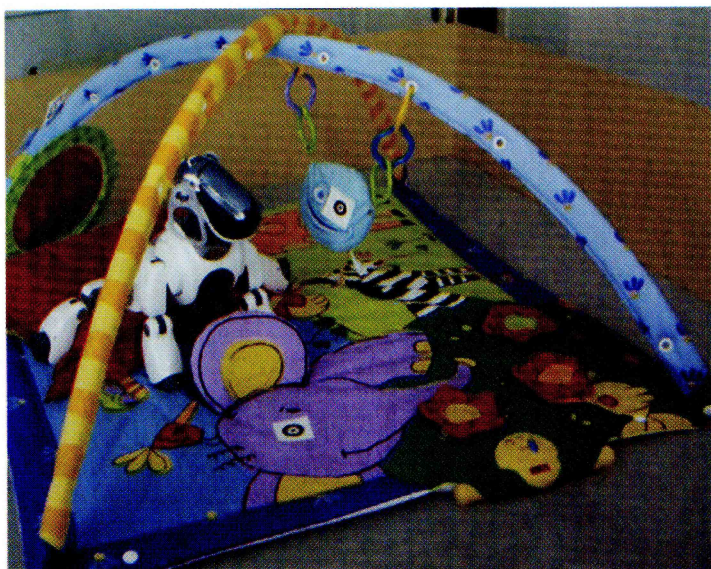


Рис. 10.1 (см. стр. 169)

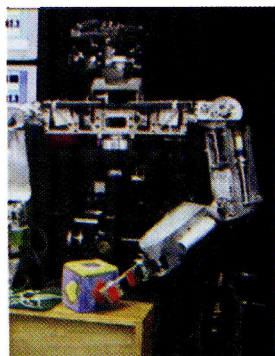


Рис. 10.2 (см. стр. 173)



Рис. 10.4 (см. стр. 177)

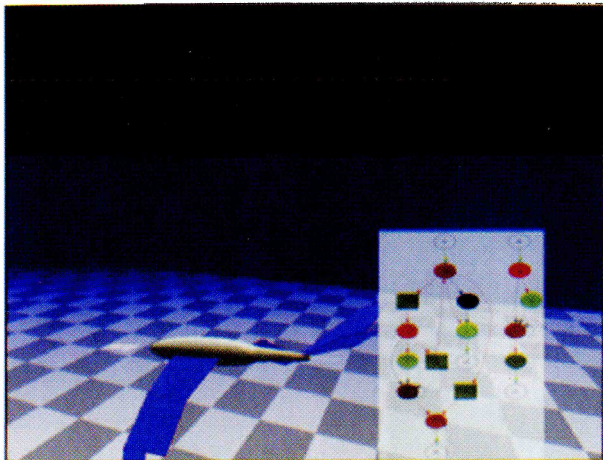


Рис. 10.7 (см. стр. 186)

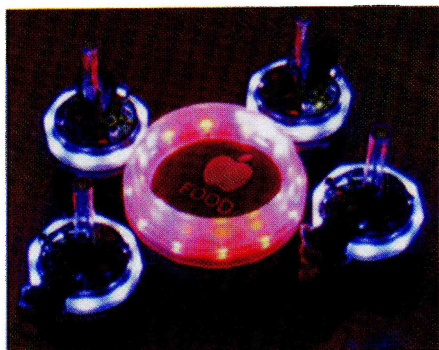


Рис. 10.11 (см. стр. 193)



Рис. 10.13 (см. стр. 196)

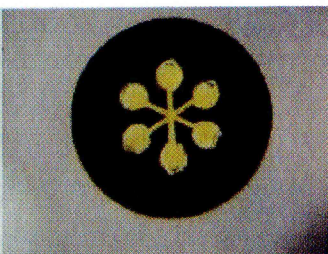
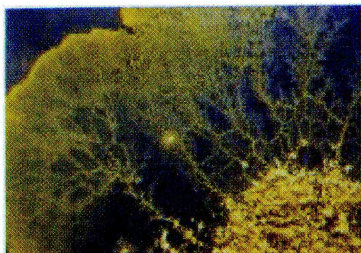


Рис. 12.3 (см. стр. 213)

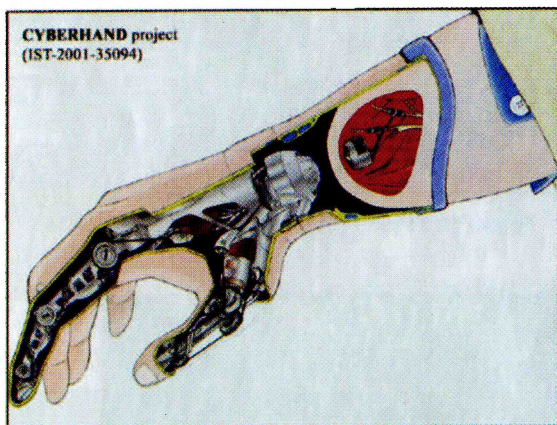


Рис. 13.1
(см. стр. 226)

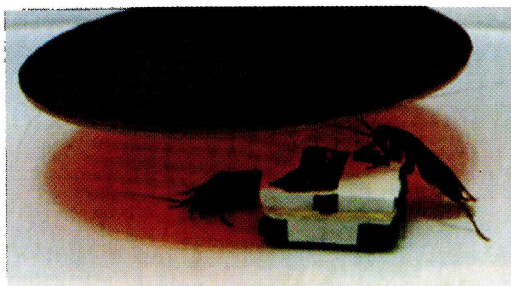


Рис. 13.7
(см. стр. 238)