

Поведение «аниматов» как модель поведения животных

Аниматами называются автономные агенты, поведение которых должно следовать принципам поведения животных. Они представляют собой полезный инструмент для изучения поведения животных. Эксперименты с такими агентами дают возможность подвергать критической проверке существующие представления о этих принципах, а также формулировать новые гипотезы, которые можно проверить на живых организмах. Результаты, полученные в этих экспериментах, уже позволили сформулировать некоторые принципы адаптивного поведения. В то же время, пока нет общей теоретической основы для создания аниматов.

Одна из тенденций развития современных «высоких технологий» — это создание автономных агентов для решения практических задач. Такими агентами могут быть роботы для сбора геологических образцов на поверхности планет или виртуальные роботы для поиска информации в Интернете. Существуют разные подходы к созданию автономных агентов. Один из подходов основан на предположении, что поведение агентов должно следовать принципам, на которых основано поведение живых организмов. Такие агенты получили название аниматов. Здесь представлено описание этого подхода и сделана попытка оценить его значение для изучения поведения живых организмов.

Мы сначала остановимся на главных признаках, отличающих аниматов от других агентов (Раздел 1), и приведем пример разработки конкретного анимата, чтобы сделать рассматриваемый подход более ясным (Раздел 2). Затем мы рассмотрим те общие принципы поведения организмов, которые были сформулированы и проверены в экспериментах с аниматами. Так как эта тема очень обширная, то мы остановимся только на некоторых из этих принципов (Раздел 3). Наконец, мы попытаемся оценить проблемы, связанные с развитием аниматов как автономных агентов (Раздел 4).

1. Создание аниматов как самостоятельная дисциплина

Рассматриваемый подход сформировался во второй половине 80-х — начале 90-х гг. Его основные положения изложены в работах (Wilson, 1991; Brooks, 1990; 1991a,b; Todd, 1992; McFarland, Voesser, 1993; Maes, 1994), а некоторые достижения в применении к изучению поведения животных можно найти в обзорах (Guillot, Meyer, 2000; 2001; Webb, 2000). Как и следовало ожидать, к настоящему времени в рамках общего подхода сформировались различные направления, перекрывающиеся с бионикой, математическим моделированием поведения животных и искусственным интеллектом. Чтобы составить представление о разнообразии этих направлений, полезно начать с ресурсов Интернета, указанных в Приложении. Однако, несмотря на это разнообразие, можно выделить то главное, что делает создание аниматов самостоятельной дисциплиной:

1. От бионических разработок аниматы отличаются тем, что в них должны быть воплощены не отдельные «патенты природы», а, как уже отмечено выше, фундаментальные принципы, определяющие поведение живых организмов, — те принципы, в силу которых это поведение отличается от поведения машин. Например, можно создать аппарат с шестью ногами и сенсорами, имитирующими глаза муравья, но,

если управление походкой и навигацией аппарата запрограммированы, исходя из некоторых «общих соображений», то это — не анимат. И наоборот, робот может передвигаться на колесах и воспринимать внешнюю среду с помощью радара, но если его действия подчиняются тем же закономерностям, что и у животных, — это анимат.

2. Даже виртуальный анимат отличается от «обычных» математических моделей поведения животных. Отличие состоит в том, что для модели допустимо воспроизводить только одну сторону поведения без всякой связи с целями животного и с той средой, в которой осуществляется поведение. Например, ритм суточной активности может моделироваться осциллятором, переключающимся между активной и неактивной фазами, без всяких указаний на то, что именно делает организм во время активной фазы и как это способствует адаптации организма к среде. Напротив, анимат должен быть целостным агентом, т.е. он должен выполнять все действия, необходимые для достижения определенной цели в конкретной, пусть и виртуальной среде. В применении к суточному ритму это означает, что анимат должен решать определенные задачи в течение активной фазы, например, успевать восстанавливать свои энергетические ресурсы в среде с определенным распределением пищи.
3. От традиционных разработок в области искусственного интеллекта аниматы отличаются не только ориентацией на принципы поведения животных. Не менее важно то, что создание аниматов ориентировано в конечном итоге на решение ими нечетко сформулированных задач в плохо предсказуемой среде — т.е. таких, с которыми приходится иметь дело живым организмам. Аниматы создаются не для игры в шахматы, а для таких задач, как исследование поверхности планет в условиях, когда время и ресурсы робота ограничены, а местность не изучена.
4. Эти особенности аниматов открывают новые возможности для биологии. В самом деле, лучшая проверка наших знаний о механизмах адаптивного поведения животного в его естественной среде — это воссоздать по возможности полный аналог животного и посмотреть, насколько поведение такого аналога и в самом деле адаптивно в той же самой среде. И, хотя выполнение этой исследовательской программы в полном объеме нереально, даже её частичное осуществление (например, если виртуальный агент, только частично воспроизводящий поведение живых прототипов, изучается в виртуальной среде, частично имитирующей реальную), обещает быть перспективным. Можно надеяться, что эксперименты с аниматами позволят:
 - подвергнуть проверке существующие представления о фундаментальных механизмах поведения животных.
 - сформулировать новые представления, которые в дальнейшем могут быть проверены в экспериментах с реальными организмами.

2. Пример анимата

Приведем пример использования анимата для изучения механизма ориентации самцов тутового шелкопряда в струе феромона самки (Kuwana et al., 1996a,b). Самец воспринимает запах с помощью рецепторов, расположенных на двух симметричных антеннах. Классическая модель ориентации предполагает, что самец всегда поворачивает в сторону той антенны, рецепторы которой возбуждены сильнее. Эта модель была проверена следующим образом.

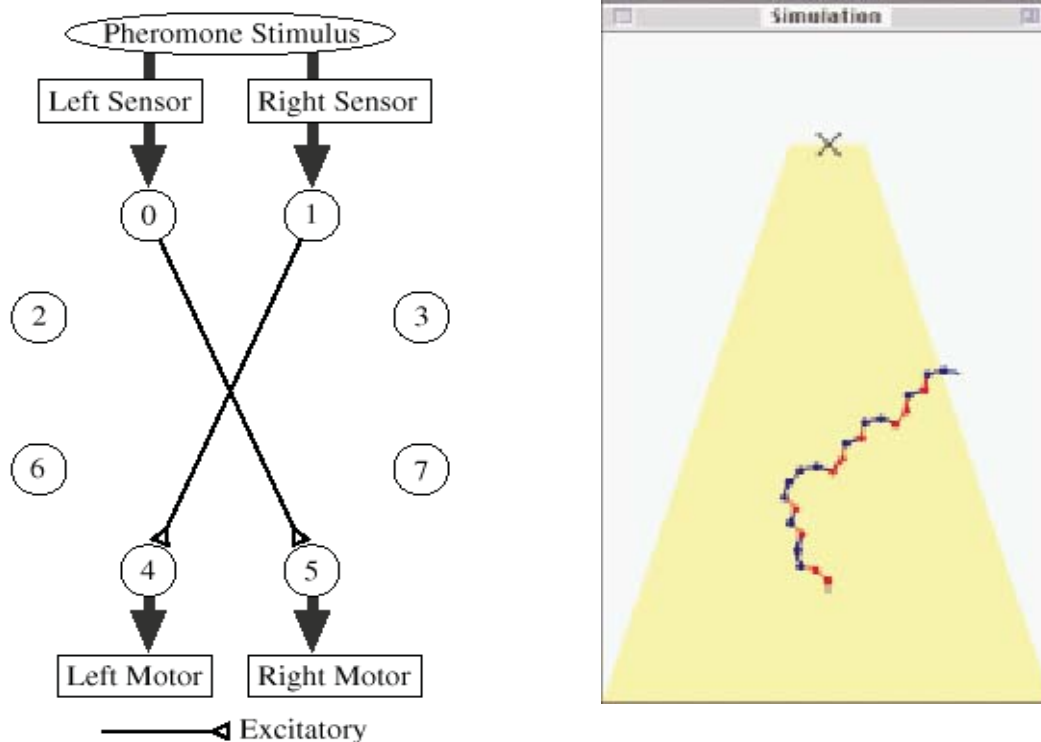


Рис. 1. Слева: сеть, соответствующая классическому представлению об ориентации бабочек. Справа: траектория в струе запаха (желтый цвет), типичная для этой сети. «Бабочка» выходит за пределы струи и не находит источник запаха X (Kuwana et al., 1996a,b).

На первом этапе авторы создали нейронную сеть, соответствующую классической модели. В этой сети сигналы от левой антенны возбуждали эффекторы на правой стороне тела самца, и наоборот. Однако компьютерные эксперименты с ориентацией в струе запаха показали неэффективность этого механизма по сравнению с поведением реальных бабочек: виртуальные самцы часто выходили за пределы струи и не могли найти её снова (рис. 1).

На втором этапе с помощью генетического алгоритма была создана более сложная нейронная сеть, позволившая в компьютерном эксперименте воспроизвести наблюдаемую у реальных самцов успешную ориентацию.

На третьем этапе авторы проверили, насколько эффективно полученная нейронная сеть обеспечивает ориентацию физического робота, получавшего сигналы от установленных на нем настоящих антенн шелкопряда. Нейронная сеть передавала преобразованный сигнал колесам робота. Проверка показала, что, в отличие от компьютерного эксперимента, робот ориентировался гораздо хуже, прежде всего потому, что в потоке, несущем феромон, всегда имеет место турбулентность, которая не может не влиять на ориентацию, но не воспроизводится реалистично в компьютерных экспериментах.

Наконец, сеть была модифицирована так, что, в отличие от классической модели, ориентация включала не только повороты в сторону наибольшего раздражения, но и

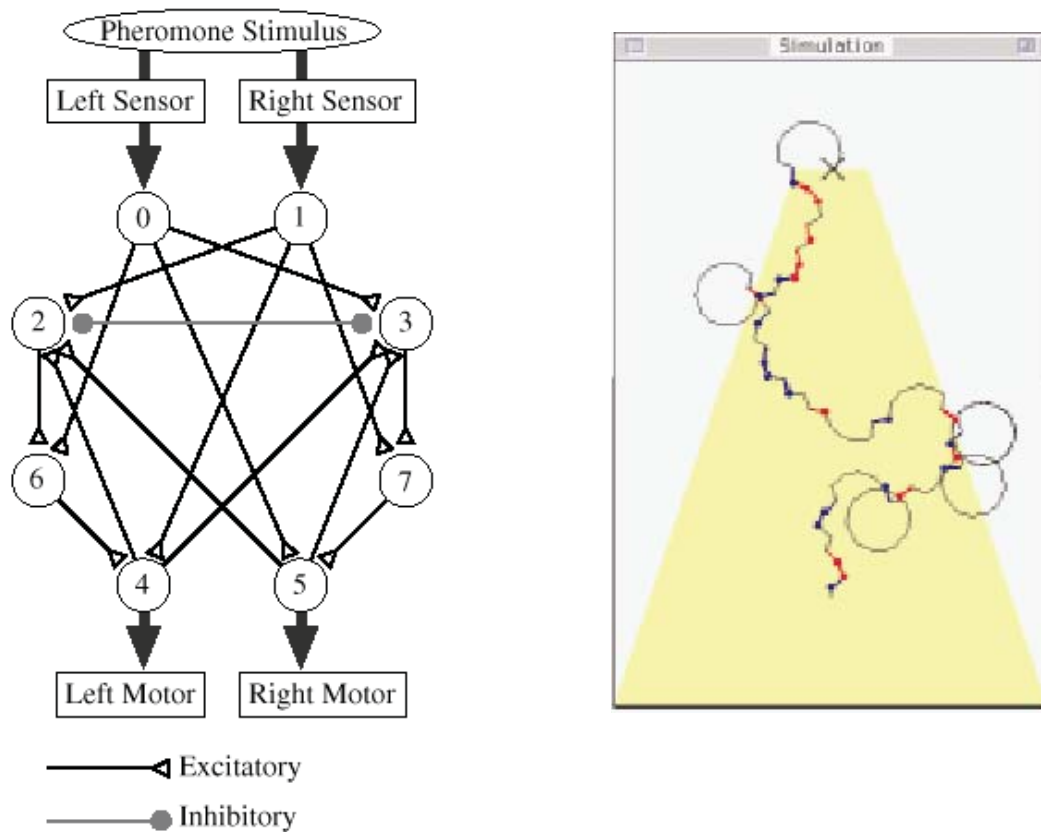


Рис. 2. Новая сеть и соответствующая ей траектория «бабочки» в струе запаха (там же).

спонтанные, независимые от раздражения зигзаги при движении в струе запаха, а также петли, описываемые самцами, вышедшими за пределы струи (Рис. 2). Сравнение с экспериментальными данными показало, что такое поведение характерно и для реальных бабочек. С помощью модифицированной сети робот успешно находил источник запаха, переносимого струей воздуха. Таким образом, использование робота и реального потока воздуха в данном исследовании имело принципиальное значение для понимания ориентации бабочек.

Полученные результаты могут стать основой для дальнейшего изучения механизма ориентации шелкопрядов уже на нейрофизиологическом уровне. Например, можно попытаться обнаружить в нервной системе бабочек механизм, соответствующий нейронной сети анимата.

Это исследование показывает, как могут дополнять друг друга эксперименты с аниматами и реальными организмами. В результате появляется возможность создать робота, пригодного, в принципе, для практических целей, а также сформулировать гипотезы для лучшего понимания механизмов поведения живых организмов. Следует отметить, что аналогичные исследования механизмов ориентации и поискового поведения, последовательно сочетающие эксперименты с живыми организмами, виртуальными моделями и физическими роботами, стали распространенными в последнее время (Morse et

al., 1997; Lund et al., 1998; Grasso et al., 2000; Lambrinos et al., 2000). Одна из причин быстрого развития таких исследований — практические задачи, например, поиск мин на минных полях, а также обнаружение источников химического загрязнения в водоемах (Gelenbe et al., 1997; Grasso et al., 2000).

3. Принципы адаптивного поведения

В предыдущем разделе мы рассмотрели использование аниматов для изучения частной формы поведения - ориентации. Однако наибольший интерес представляют исследования, позволяющие формулировать фундаментальные принципы адаптивного поведения, применимые к разным его формам. Некоторые из таких принципов, не всегда соответствующие сложившимся представлениям о механизмах адаптивного поведения живых организмов, рассматриваются в разделах 3.1 — 3.3.

3.1. Внешне сложное адаптивное поведение не обязательно осуществляется сложным механизмом. Оно может порождаться в результате взаимодействия элементарных правил поведения между собой и с внешней средой, непосредственно в ходе самого поведения.

Исследования в области искусственного интеллекта, характерные для 70-х годов, были традиционно основаны на предположении, что агент в ходе решения какой-либо задачи должен собрать информацию о среде, построить на основе этой информации модель (репрезентацию) среды, затем разработать план своих будущих действий на основе этой модели и, наконец, приступить к исполнению плана. Соответственно, архитектура агента должна состоять из иерархии модулей, соответствующих перечисленным этапам (рис. 3 вверху). Опыт показал, что такой подход оправдывает себя в искусственной среде с заранее заданными и известными агенту свойствами. Однако при решении практических задач в естественной среде её свойства не всегда известны агенту, время, необходимое для сбора информации, оказывается неприемлемо большим, а способность агента строить модель среды — крайне ограниченной.

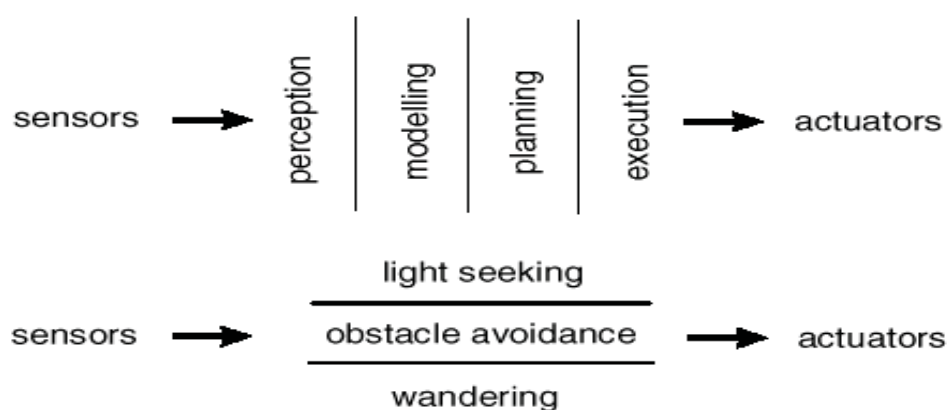


Рис. 3. Вверху: иерархическая архитектура агента, соответствующая традиционному представлению. Внизу: модули, управляющие отдельными действиями, воспринимают сигналы и запускают соответствующие действия независимо один от другого, конкурируя за эффекторы (Brooks, 1986).

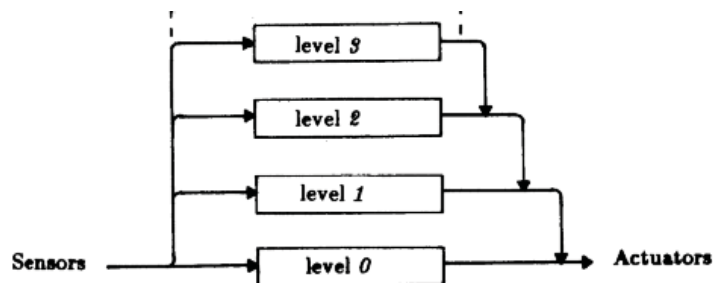


Рис. 4. «Поглощающая архитектура» — один из вариантов взаимодействия модулей. Каждый модуль блокирует доступ к эффекторам модулям нижних уровней, если получает соответствующий внешний сигнал (Brooks, 1986).

Альтернативный подход был предложен во второй половине 80-х годов и заключается в том, чтобы имитировать те способы принятия решений, которые предположительно используются животными в их естественной среде (Brooks, 1986; 1990; 1991). Было постулировано, что агент должен состоять из отдельных модулей, каждый из которых независимо управляет отдельной формой поведения без какого-либо моделирования среды или планирования действий: действия запускаются в ответ на внешние сигналы или даже просто спонтанно. Эти элементарные действия могут представлять собой ненаправленное блуждание, движение к цели, поворот в сторону от препятствия, схватывание какого-либо объекта и т.п. Результирующее адаптивное поведение создается в этом случае конкуренцией модулей (рис. 3 внизу). Один из вариантов этой схемы, так называемая «поглощающая архитектура» (subsumption architecture: Brooks, 1986), предполагает, что модули неравноправны: одни из них перекрывают модулям низшего ранга доступ к эффекторам, если получают соответствующий сигнал (рис. 4). Например, пока агент не воспринимает каких-либо специфических сигналов, он может блуждать по местности, чтобы обнаружить заданную цель. Когда цель обнаружена, становится активным модуль движения к цели, который блокирует доступ к эффекторам модулю ненаправленного движения. Если на пути к цели обнаружено препятствие, то активным становится модуль, задающий поворот и движение в сторону, причем этот модуль подавляет все остальные модули. Когда агент оказывается в стороне от препятствия, снова растормаживается модуль движения к цели.

Несмотря на крайнюю простоту такого рода схем, они дали хорошие результаты при создании роботов, способных к адаптивному поведению, т.е. способных выполнять осмысленные задачи несмотря на препятствия. Так, эксперименты с навигацией роботов на пересеченной местности показали, что «поглощающая архитектура» действительно способна обеспечить достижение цели при полном отсутствии модели внешней среды и плана действий (Lorigo et al., 1997).

Следует отметить, что поведение, запускаемое каждым модулем можно представить в виде правила «if условие S then действие A», а поведение всего агента может быть задано в виде программы, включающей список правил и отношения между ними. Простота программирования такого рода агентов привела к широкому их использованию. Характерным примером может служить моделирование роли допамина в базальном ганглии крыс (Gonzalez et al., 2000). На основании физиологических исследований было известно, что «решения» о том, какое действие выполнить в данный момент, принимает-

ся в базальном ганглии мозга крыс. Например, если крыса голодна, она выходит из своего затененного гнезда вдоль стенки вольера, находит пищу, хватается её, снова находит стенку и возвращается вдоль неё в гнездо. Если она не голодна, доминирует страх, которым подавляется выход из гнезда. Кроме того, было известно, что от уровня дофамина в базальном ганглии зависит характер выполнения этих действий. Если уровень слишком низок, то действия крысы замедлены и она часто не способна реагировать на раздражитель. Если уровень слишком высок, то наблюдается гиперактивность, а также быстрое переключение между разными действиями, в результате чего ни одно из них не доводится до конца. Авторы разработали модель, в соответствии с которой в базальном ганглии происходит сравнение входов от разных сенсоров и от разных мотивационных систем, а допамин увеличивает общую активацию, необходимую, чтобы доминирующие сигналы и мотивации могли подавить другие входы и запустить моторные команды, соответствующие только одному определенному действию.

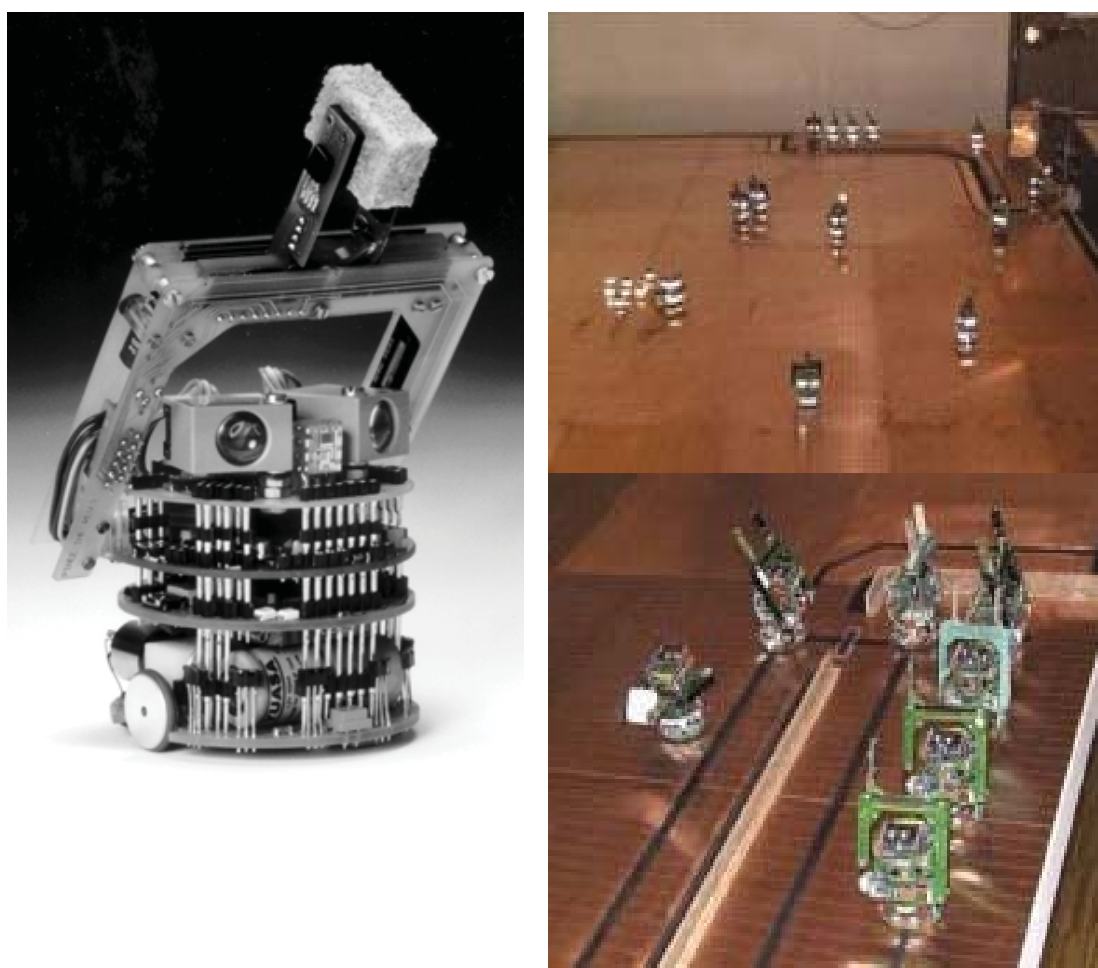


Рис. 5. Робот Кхепера (высота около 5 см) с «пищей» в захвате и арена с роботами.

Для проверки модели был использован робот с телекамерами и захватом (рис. 5). Робот имитировал описанное выше движение вдоль стенки, выход на открытое пространство при обнаружении «пищи» телекамерами, захват её и транспортировку вдоль стенки в гнездо. Уровень дофамина имитировался увеличением или уменьшением всех входных сигналов в «базальном ганглии» на одну и ту же величину одновременно. В результате, как и у крыс, снижение «уровня дофамина» приводило к тому, что робот мог не подойти к обнаруженной «пище» или, подойдя к ней, не захватывал её. Кроме того, движения робота были замедлены. При повышенном уровне «дофамина», наоборот, движения ускорялись, а робот мог быстро переключаться между двумя действиями. Например, взяв «пищу» с помощью захвата, он мог несколько раз поднимать и опускать его вместо того, чтобы с поднятым захватом нести «пищу» к гнезду.

Авторы пришли к выводу, что эти результаты подтверждают предположения о механизме выбора действия в базальном ганглии и роли дофамина в этом механизме. Таким образом, управление сложным фуражировочным поведением крыс может быть объяснено конкуренцией простых действий, правил поведения в ответ на сигналы.

Взаимодействием правил можно объяснить не только поведение отдельной особи, но и групп организмов. На рис. 6 показана часть алгоритма, обеспечивающего координированное передвижение стаи виртуальных рыб, включая обход стаей препятствия, разделение стаи перед препятствием и её восстановление после обхода (рис. 7). Алгоритм представляет собой набор правил, предписывающих рыбе реакции на других особей в зависимости от дополнительных внешних стимулов. С помощью аналогичных алгоритмов можно также воспроизвести преследование стаи хищником и её бегство от него (рис. 8). В конечном итоге, на основе списка подобных правил была создана виртуальная экосистема для учебных и исследовательских целей (Terzopoulos et al., 1994).

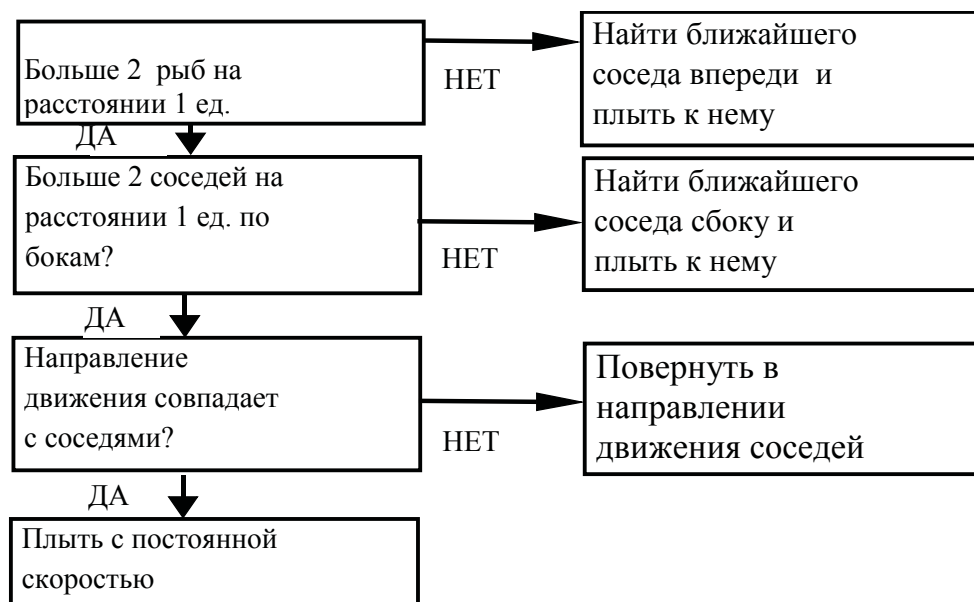


Рис. 6. Алгоритм поведения особей в стае (Terzopoulos et al., 1994, с изменениями).

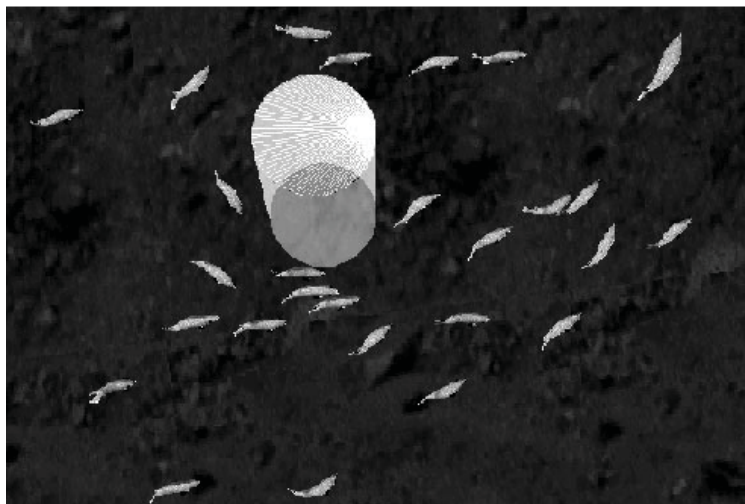


Рис. 7. Обход препятствия стаей рыб (Terzopoulos et al., 1994).



Рис. 8. Хищник преследует стаю рыб (там же).

В чем значение аниматов, поведение которых основано на принципе взаимодействия простых правил? Они показывают, что адаптивное поведение может осуществляться без построения агентом модели среды в явном виде. Вместо этого, сам набор правил и отношения между ними могут рассматриваться как неявная модель мира, в котором действует агент.

Конечно, мы знаем, что только взаимодействием правил нельзя объяснить разнообразие и сложность адаптивного поведения животных. Однако поведение аниматов можно сравнить с поведением реальных животных и посмотреть, насколько указанный принцип соответствует реальности, и для каких ситуаций он оказывается недостаточным.

3.2. Правила адаптивного поведения должны быть основаны на «гипотезах» о предполагаемом состоянии среды, а не просто реакциями на воспринимаемые сигналы.

Правила поведения, приведенные в разделе 3.1, можно назвать «реактивными»: анимат реагирует только на текущий сигнал (например, препятствие), и реакция прекращается, как только сигнал исчезает. Такое поведение не всегда адаптивно, что можно показать на простом примере. Пусть анимат попал в угол, образованный двумя стенками, и пусть обход препятствия управляется правилом, вызывающим поворот влево, если препятствие обнаружено справа, или поворот вправо, если препятствие находится слева. Если анимат сначала обнаружит правую стенку, то повернет влево и обнаружит левую стенку. Это заставит его повернуть вправо, в результате чего агент снова обнаружит правую стенку и повернет влево. Это цикл может бесконечно повторяться и анимат окажется пойманным в ловушку. Чтобы избежать этого, требуется, чтобы обнаружение стенок вызывало не отдельные действия, а более сложную тактику. Например, анимат мог бы после повторного обнаружения левой стенки повернуть не вправо, а, наоборот, влево и двигаться вдоль этой стенки до тех пор, пока не выйдет из угла. Если и эта тактика не помогает, то следует попробовать третью тактику и т.д. В общем случае можно потребовать, чтобы анимат был способен:

- Отвечать на отдельный сигнал не отдельной реакцией, а серией действий, т.е. анимат должен генерировать некоторую тактику в ответ на сигнал.
- Придерживаться избранной тактики некоторое время, даже если вызвавший её сигнал исчез, а тактика не сразу приводит к желаемому результату. Это означает, что правила поведения должны быть не реактивными, а «предиктивными».
- В конце концов менять тактику, если она не приводит к успеху.

Возможна и другая формулировка сказанного: агент, с точки зрения внешнего наблюдателя, должен вести себя так, как если бы он руководствовался некоторыми гипотезами о будущем состоянии среды. Важно отметить, что гипотезы могут быть приближительными и даже ошибочными, так как у анимата, действующего в неизвестной, плохо предсказуемой среде, нет времени (а также сенсорных и вычислительных возможностей) для полного анализа среды. Поэтому гипотезы могут быть основаны только на отдельных сигналах, которые, к тому же, могут быть искажены помехами. Адаптивное поведение при таких условиях может быть результатом:

- Быстрой генерации и проверки новых тактик.
- Соответствия тактик общим физическим закономерностям среды, в которой действует анимат.

Следует отметить, что поведение живых организмов, в том числе «низших», отвечает этим требованиям. Можно привести следующий пример. Некоторые насекомые в ответ на запах феромона или пищи начинают двигаться против ветра, что, в принципе, позволяет найти источник запаха. Однако запах в турбулентном потоке воздуха распределен не равномерно, а отдельными «облаками». Если насекомое перестает воспринимать запах, то все же продолжает движение против ветра в течение некоторого времени, как бы предполагая, что вслед за первым облаком появится и второе. Если новое облако не встречается, то можно предположить, что насекомое отклонилось от верного направления, и оно меняет тактику: двигается зигзагами поперек ветра. Это помогает вновь найти струю запаха, если насекомое действительно потеряло правильное направление. Разумеется, насекомому не известно, в каком случае оно просто вышло из облака, но двига-

ется в правильном направлении, а в каком случае направление потеряно. Однако чередование тактик позволяет в большинстве случаев достигать цели. Кроме того, в этих тактиках отражены самые общие закономерности среды, в которой действует насекомое: запах распространяется потоком воздуха, в потоке может иметь место турбулентность, разрывающая струю запаха, и т.д.

Предиктивные правила показали свою эффективность и при решении некоторых задач аниматами. В качестве примера можно привести решение роботом задачи выхода из угла при использовании реактивных и предиктивных правил (Clark et al., 2000).

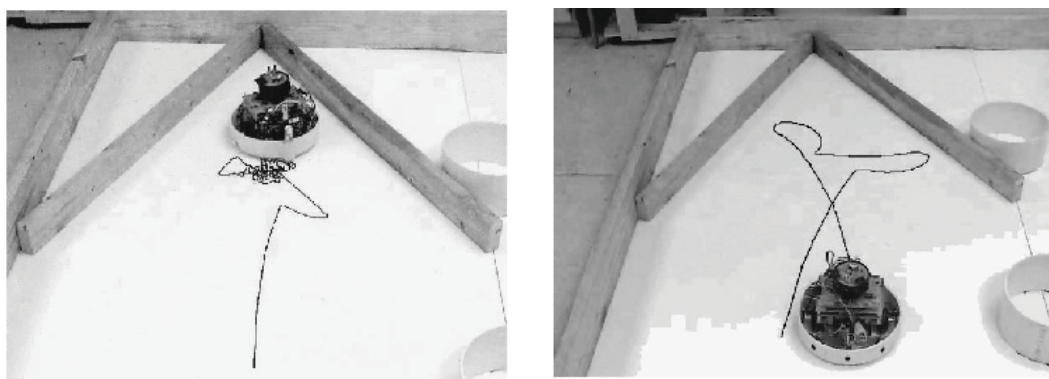


Рис. 9. Поведение робота, управляемого реактивными (слева) и предиктивными правилами (справа). Траектория робота показана черной линией (Clark et al., 2000).

На рис. 9 (слева) показано, как робот, передвигающийся на колесах и снабженный двумя симметричными сенсорами, попадает в ловушку, если его правила поведения при касании сенсором стенки сводятся к поворотам в противоположную сторону. В другом эксперименте поведение этого же робота управлялось нелинейным осциллятором. Осциллятор обладал двумя свойствами: 1) последствием: прикосновение к стенке вызывало не отдельный поворот, а довольно сложный маневр; 2) стохастичностью: этот маневр зависел не только от сигнала, но и от состояния системы, которое, в свою очередь, определялось её прошлыми состояниями, в результате чего маневры никогда не повторялись в точности. На рис. 9 (справа) показано, как такие маневры обеспечивали выход из угла. Робот сформировал свою тактику не на основе анализа ситуации, внутренней её репрезентации или построения модели среды. Эта тактика порождена взаимодействием внутренней динамики осциллятора, управляющего роботом, с немногими доступными ему внешними сигналами.

В другой работе (Walker, Miglino, 1999) имитировалась способность цыплят находить в простом лабиринте обходной путь к цели, прямой доступ к которой был закрыт решеткой. Чтобы решить эту задачу, цыплятам приходится некоторое время двигаться в направлении, противоположном цели, теряя зрительный контакт с ней. Эта задача считается сложной, так как для её решения предположительно требуется построить внутреннюю репрезентацию лабиринта — его когнитивную карту. Однако с помощью генетического алгоритма была создана нейронная сеть, решавшая эту задачу без какой-либо когнитивной карты. Если робот, управляемый сетью, сталкивался с решеткой, то

он поворачивал от цели и двигался вдоль стены лабиринта до тех пор, пока не находил свободный проход к цели. Разумеется, эта работа не доказывает, что цыплята не строят когнитивной карты. Однако она показывает, что с помощью предиктивных правил, рассчитанных на результат, ожидаемый в будущем, можно решить сложную задачу без построения модели среды.

Описание аналогичных и более сложных предиктивных правил у роботов, управляемых нейронными сетями, можно найти в обзоре Т. Зимке (Ziemke, 2001).

4. Проблемы, связанные с разработкой аниматов

Задачи, которые в настоящее время способны решать аниматы, довольно просты. Движение к заданной цели с обходом препятствий на местности, а также сбор «пищи» с транспортировкой в «гнездо» в лабораторных условиях (Раздел 3) представляют собой типичные примеры. Как уже было сказано в начале этой статьи, автономный агент должен быть целостным, т.е. способным самостоятельно находить выход из ситуаций, возникающих в некоторой среде. Существует два основных подхода к достижению этой цели.

4.1. Списки правил

В принципе, задачу можно решать следующим образом. Можно создать программу поведения агента, представляющую собой список правил поведения, учитывающий все возможные ситуации, в которых может оказаться агент. Каждое правило может предписывать конкретную последовательность действий в ответ на конкретную последовательность сигналов, как это сделано в примерах из Раздела 3.1. Правила могут быть заданы либо программными средствами, либо в виде самостоятельных физических модулей, каждый из которых действует в соответствии с отдельным правилом (Раздел 3.1). На практике такой способ широко используется. Однако у этого подхода есть очевидные недостатки. Во-первых, модельер не может предвидеть все ситуации, с которыми столкнется анимат в сколько-нибудь реалистичной среде, где ему придется действовать. Во-вторых, чем сложнее среда, тем больше разрастается список правил и здесь может возникнуть новая проблема: не будет ли одна и та же ситуация вызывать непредусмотренное одновременное выполнение разных правил и конфликт между ними. Наконец, если анимат должен руководствоваться предиктивными правилами поведения и изменять их в соответствии с ситуацией, то модельер должен задать дополнительные правила для изменения правил.

4.2. Анимат как динамическая система

Наиболее строгое требование к подлинно автономному агенту состоит в том, что он должен не только следовать заранее заданным правилам, но и порождать новые правила самостоятельно (Smithers, 1997). Один из возможных способов создания анимата, отвечающего этому требованию, состоит в следующем. Нервная система животного может рассматриваться как нелинейная динамическая система, в поведении которой отражается не только текущий сигнал, но и внутреннее состояние системы, которое, в свою очередь, зависит от последовательности предыдущих сигналов. Известно, что динамическая система, состоящая из одних и тех же взаимодействующих модулей, может порождать разные последовательности действий в зависимости от истории внешних воздействий

на систему. Некоторые исследователи предполагают, что это дает возможность создать агента, способного к разнообразным адаптивным последовательностям действий без заранее заданного списка правил (Steels, 1994; Jaeger, 1998; Gelder, 1999; Beer, 1997; 2000).

По существу, осциллятор, управляющий роботом (Раздел 3.1), служит примером такого подхода. К настоящему времени наибольшие достижения в этом направлении связаны с созданием нейронных сетей для имитации различных походок у животных. Например, с помощью генетического алгоритма был создан осциллятор для управления движением виртуальной саламандры (Ijspeert, Arbib, 2000; Ijspeert, 2001). На осциллятор поступал сигнал от «глаз». В зависимости от интенсивности сигнала походка анимата менялась, что можно рассматривать как порождение разных правил поведения одной и той же системой. Кроме того, если источник сигнала находился на периферии поля зрения «саламандры», то она поворачивала в сторону источника. В результате анимат был способен преследовать движущуюся цель, т.е. демонстрировать еще одно правило поведения, не заданное модельерами в явном виде (рис. 10). Другим авторам удалось создать небольшие нейронные сети (от 2 до 10 «нейронов»), генерирующие две-три разные последовательности выходных сигналов в ответ на разные последовательности входных сигналов (Yamauchi, Beer, 1994).

В связи с динамическим подходом возникают очевидные вопросы. Как создать динамическую систему, порождающую количество правил, сопоставимое с разнообразием поведения животных, чтобы обеспечить решение реальных задач? Не будет ли сложность такой системы возрастать быстрее, чем сложность требуемого адаптивного поведения? Одно из предложенных решений состоит в том, что отдельные компоненты системы, отвечающие за отдельные формы поведения, создаются последовательно. Так, группой исследователей (Kodjabachian, Meyer, 1998) с помощью генетического алгоритма сначала была создана нейронная сеть, обеспечивающая управление ходьбой у виртуального шестиногого робота. Затем была создана дополнительный модуль, где нейронная сеть преобразовывала сигналы от рецепторов запаха и передавала их первой сети, так что робот оказался способным ориентироваться по запаху. Наконец, был добавлен еще один модуль с сетью, передававшей сигнал от рецепторов прикосновения первому модулю, обеспечивая обход препятствий. Авторы показали, что робот, созданный таким «инкрементальным» путем, лучше решает задачу движения к источнику запаха с обходом препятствий, чем робот, для которого сразу создавалась общая нейронная сеть для ходьбы, обхода препятствий и ориентации на звук. Однако этот обнадеживающий результат был получен при выполнении задачи в упрощенной среде и не дает окончательного ответа вопросы, поставленные выше.

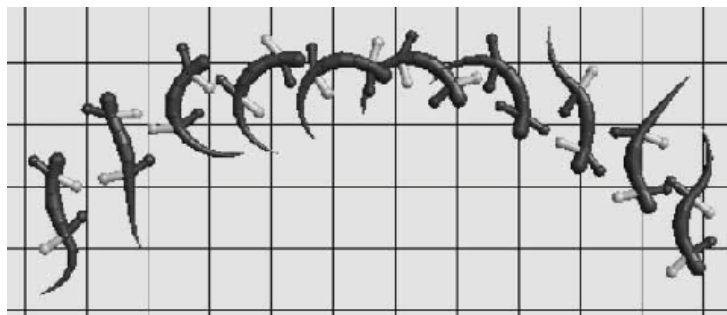


Рис. 10. Поворот «саламандры» вслед за зрительным раздражителем (Ijspeert, 2001).

4.3. Что является необходимым условием адаптивного поведения?

Ответа на этот вопрос пока нет, и поэтому создание действительно автономных агентов остается только перспективой. Зато можно сделать вполне определенный вывод о том, что в настоящее время отсутствует теоретическая основа для создания аниматов. Другими словами, отсутствует теория адаптивного поведения. На наш взгляд, главная проблема, которую требуется разрешить — это то, каким образом животные «изобретают» новые адаптивные правила поведения. Приведем такой пример. Гнездо ос было помещено в садок, где осы могли летать в противоположный конец садка и брать там сахарный сироп из кормушки. Одна из ос, родившаяся с укороченными крыльями, летать не могла и просто ходила к кормушке по стенке садка. Вряд ли можно предположить, что у осы имелась запасная наследственная программа пешей фуражировки. В природе осы не ходят за добычей и не имеют возможности для этого. Поведение осы нельзя объяснить и привлекающим действием кормушки: для насекомых сахарный сироп лишен запаха. Таким образом, оса показала себя подлинно автономным агентом, способным выйти из трудного положения, используя необычную ситуацию. Как ни прост этот пример, аниматы на такие нестандартные и самостоятельные решения пока не способны.

Заключение: чему могут научить аниматы

Мы изложили лишь небольшую часть того, что сделано в области разработки аниматов. Тем не менее, и это краткое изложение показывает, что аниматы представляют собой полезный инструмент для изучения поведения животных. Они позволяют подвергать критической проверке наши представления о том, как организовано поведение животных, а также формулировать новые гипотезы, которые можно проверить в биологических экспериментах. Конечно, можно возразить, что такие гипотезы можно выдвигать и не прибегая к экспериментам с роботами. Однако гипотезы не рождаются на пустом месте, для них нужна питательная среда и эксперименты с аниматами являются такой средой. Её не всегда могут заменить чисто биологические эксперименты, в частности потому, что не всегда возможно «увидеть» механизм, стоящий за наблюдаемым поведением животного. Аниматы уже преподнесли исследователям несколько важных уроков:

- Не обязательно придумывать сложные механизмы управления для того, чтобы объяснить внешне сложное поведение. Маневры стай рыб или птиц заставляют думать о сложной системе управления стаей, но эти маневры можно объяснить простыми взаимодействиями между соседними особями.
- И наоборот, внешне простые (и потому не привлекающие внимания исследователей) действия животных могут требовать сложной организации поведения. Вспомним, какой непростой задачей оказывается выход из угла, когда мы сами должны «объяснить» роботу, как её решить.
- Традиционная этология не интересуется тем, как животное может изобрести новое правило поведения в непредусмотренной ситуации. Однако сравнение поведения животных и аниматов показывает, что это ключевая проблема для моделирования адаптивного поведения.

Литература

- Beer, R. D. The dynamics of adaptive behavior: A research program. *Robotics and Autonomous Systems*. 1997. V.20. №2. P.257-289. <http://vorlon.cwru.edu/~beer/>
- Beer R. D. Dynamical approaches to cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*. 2000. V.4.#3.P.91-99.
- Brooks, R. A. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1986. V.2. №1. P.14-23. <http://www.ai.mit.edu/people/brooks/index.shtml>
- Brooks, R. Elephants Don't Play Chess. in P. Maes, ed., 'Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back', MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990, P.3-15.
- Brooks R.A. New approaches to robotics. *Science*. 1991b. V.253. P.1227-1232.
- Brooks R.A. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*. 1991a. V. 47. №1. P.139-159.
- Clark M.R., Anderson G.T., Skinner R.D. Coupled Oscillator Control of Autonomous Mobile Robots. *Autonomous Robots*. 2000. V.9. №2. P.189—198. <http://robotics.ualr.edu>
- Gelder T. J., van. Defending the dynamical hypothesis. In W. Tschacher & J.-P. Dauwalder ed., *Dynamics, Synergetics, Autonomous Agents: Nonlinear Systems Approaches to Cognitive Psychology and Cognitive Science*. Singapore: World Scientific, 1999. P.13-28. <http://www.arts.unimelb.edu.au/~tgelder/Publications.html>
- Gelenbe E., Schmajuk N., Staddon J., Reif J. Autonomous search by robots and animals: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*. 1997. V.22. №1. P.23-34.
- Gonzalez F.M., Prescott T.J., Gurney K., Humphries M., Redgrave P. An embodied model of action selection mechanisms in the vertebrate brain. In *From Animals to Animats 6: Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Meyer, J.-A., Berthoz A., Floreano, D., Roitblat, H., & Wilson, S.W. (Eds.) MIT Press: Cambridge, MA., 2000. P.157-166. <http://www.shef.ac.uk/~abrg/bg/publications.html>
- Grasso F., Consi T. R., Mountain D. C., Atema J. Biomimetic Robot Lobster Performs Chemo-orientation in Turbulence Using a Pair of Spatially Separated Sensors: Progress and Challenges. *Robotics and Autonomous Systems*. 2000. V. 30. №1. P.115-131. http://biomimetics.mbl.edu/~fgrasso/short_references.html
- Guillot A., Meyer J.-A. From SAB94 to SAB2000: What's New, Animat? 2000. <http://www-poleia.lip6.fr/ANIMATLAB>
- Guillot A., Meyer J.-A. The Animat Contribution to Cognitive Systems Research. In *Journal of Cognitive Systems Research*. 2001. 2(2), 157-165. .
- Jaeger H. Multifunctionality: a fundamental property of behavior mechanisms based on dynamical systems. In: R. Pfeifer, B. Blumberg, J.-A. Meyer, and S.W. Wilson (eds.): *From animals to animats 5: Proc. of the fifth int. conf. on simulation of adaptive behavior*. MIT Press 1998, 286-290 <http://www.gmd.de/People/HerbertJaeger/Publications.html>
- Ijspeert A.J. A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. *Biological Cybernetics*. 2001. V.84. №5.P.331-348. <http://rana.usc.edu:8376/~ijspeert/publications.html>
- Ijspeert A.J., Arbib M. Visual tracking in simulated salamander locomotion, *From Animals to Animats, Proceedings of the 6th International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior (SAB2000)*, Paris, September 11-15, 2000. P.88-97.
- Kodjabachian J., Meyer J.-A. Evolution and development of neural networks controlling locomotion, gradient-following, and obstacle avoidance in artifi-

- cial insects. IEEE Transactions on Neural Networks. 1998. V.9. №4. P.796-812. http://www-poleia.lip6.fr/ANIMATLAB/animat_accueil_eng.html
- Kuwana Y., Shimoyama I., Sayama Y., Miura H. Synthesis of Pheromone-Oriented Emergent Behavior of a Silkworm Moth. Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 1996a. P.1722-1729. <http://www.leopard.tu-tokyo.ac.jp>
- Kuwana Y., Shimoyama I., Sayama Y., Miura H. A Robot that Behaves like a Silkworm Moth in the Pheromone Stream. Proceedings of the Int. Conf. Artificial Life V, 1996b. P.337 — 343.
- Lambrinos D., Moller R., Labhart T., Pfeifer R., Wehner R. A mobile robot employing insect strategies for navigation. Robotics and Autonomous Systems. 2000. V.30. №1. P.39—64. <http://www.ifi.unizh.ch/groups/ailab/people/pfeifer.html>
- Lorigo L.M., Brooks R.A., Grimson W.E.L. (1997). Visually_guided obstacle avoidance in unstructured environments . In: Proceedings of IROS'97, Grenoble, France, September 1997. P.373-379. <http://www.ai.mit.edu/people/brooks/brooks.html>
- Lund H. H., Webb B., Hallam, J. 1998. Physical and temporal scaling considerations in a robot model of cricket calling song preference. Artificial Life. 1998. V.4. №1. P.95—107. <http://www.stir.ac.uk/Departments/HumanSciences/Psychology/Staff/bhw1/index.htm>
- Maes P. Modeling adaptive autonomous agents. Artificial Life Journal. 1994. V.1. №1-2. P. 135-162. <http://pattie.www.media.mit.edu/people/pattie/cv.html#publications>
- McFarland D.J., Boesser T. Intelligent Behaviour in Animals and Robots. MIT Press, Cambridge, MA., USA, 1993.
- Morse T.M., Ferrée T.C., Lockery, S.R. (1997). Robust spatial navigation in a robot inspired by chemotaxis in *C. elegans*. Adaptive Behavior. 1997. V.6. №2. P.393-410. <http://chinook.uoregon.edu/index.html>
- Smithers T. Autonomy in Robots and Other Agents. Brain and Cognition. 1997. V.34. №1. P.88—106. <http://www.eteo.muni.es/dptos/informatica/tsmithers/index.php>
- Steels, L. The artificial life roots of artificial intelligence. Artificial Life Journal.1994. V.1. №1. P.1-87. <http://arti.vub.ac.be/steels/>
- Terzopoulos D., Tu X., Grzeszczuk R. Artificial Fishes: Autonomous Locomotion, Perception, Behavior, and Learning in a Simulated Physical World. Artificial Life. 1994. V.1. №4. P.327—351. <http://www.dgp.toronto.edu/people/tu/pub.html>
- Todd P.M. The Animat Path to Intelligent Adaptive Behavior. 1992. Computer, 25. №11. P.78-81. <http://www-abc.mpib-berlin.mpg.de/users/ptodd/publications/>
- Walker R., Miglino O. Replicating experiments in “detour behavior” with artificially evolved robots: an A-life approach to Comparative Psychology. Proceedings of the European Conference on Artificial Life (Ecal99), P.205-214. 1999.
- Webb B. What does robotics offer animal behaviour? Animal Behaviour. 2000. V.60. №5. P.545-558. <http://www.stir.ac.uk/Departments/HumanSciences/Psychology/Staff/bhw1/index.htm>
- Wilson S.W. (1991). The Animat Path to AI. In: Meyer J.A., Wilson S.W. (Eds.), From animals to animats: Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books, 1991. P. 15-21. <http://world.std.com/~sw/>
- Yamauchi B.M., Beer R.D. Sequential behavior and learning in evolved dynamical neural networks. Adaptive Behavior. 1994. V.2. №3. P.219-246. <http://vorlon.cwru.edu/~beer/>
- Ziemke, T. (2001). The Construction of ‘Reality’ in the Robot: Constructivist Perspectives on Situated Artificial Intelligence and Adaptive Robotics. Foundations of Science. 2001. V.6. №1. P.163-233. <http://www.ida.his.se/ida/~tom/>

Приложение: некоторые ресурсы в интернете

International Society for Adaptive Behavior (ISAB) <http://www.isab.org.uk/>

Страницы исследовательских лабораторий

Adaptive Systems Research Group <http://homepages.feis.herts.ac.uk/~comqcln/ASRG.html>

AI Lab, Zurich Univ., Switzerland <http://www.ifi.unizh.ch/groups/ailab/>

AnimatLab, Paris, France http://www-poleia.lip6.fr/ANIMATLAB/animat_accueil_eng.html

Bio-Robotic Lab, Case Western Univ., Cleveland, USA <http://biorobots.cwru.edu/>

COGs, Sussex Univ., UK <http://www.cogs.susx.ac.uk/index.html>

Laboratoire Bioinformatique, Lausanne, Switzerland <http://diwww.epfl.ch/Khepera/>

Los Alamos National Lab, USA <http://www.nis.lanl.gov/projects/robot/>

Mobile Robot Lab, Georgia Inst. Tech., USA <http://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/>

3 Sigma Robotics <http://www.3sigmarobotics.com>

Персональные страницы

Randall Beer <http://vorlon.cwru.edu/~beer/>

Rodney Brooks <http://www.ai.mit.edu/people/brooks/brooks.html>

Marco Dorigo <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/dorigo.html>

Dario Floreano <http://dmtwww.epfl.ch/isr/east/team/floreano/>

Auke Jan Jansen <http://rana.usc.edu:8376/~ijspeert/index.html>

Thiemo Krink <http://www.daimi.au.dk/~krink>

Orazio Miglino <http://gral.ip.rm.cnr.it/orazio/>

George Mobus <http://www.tacoma.washington.edu/css/gmobus/index.html>

Stefano Nolfi <http://gral.ip.rm.cnr.it/nolfi/>

Luc Steels <http://arti.vub.ac.be/steels/>

Peter Todd <http://www.mpib-berlin.mpg.de/users/ptodd/>

Xiaoyuan Tu <http://www.dgp.toronto.edu/people/tu/>

Stewart Wilson <http://world.std.com/~sw/>

Tom Ziemke <http://www.ida.his.se/ida/~tom/>

Библиографии со ссылками на электронные публикации

Biomorphic Robotics: <http://www.iguana-robotics.com/RobotUniverse/BiomorphicRobots.htm>

Online ALife Publications <http://www.cogs.susx.ac.uk/users/ezequiel/alife-page/alife.html>

Zooland: The Artificial Life Resource <http://alife.ccp14.ac.uk/zooland/zooland/>

Complexity Papers Online <http://www.calresco.org/papers.htm>

Непомнящих Валентин Анатольевич
кандидат биологических наук
Институт биологии внутренних вод РАН
nepom@ibiw.yaroslavl.ru